



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**Prediccions d'agitació portuària utilitzant un model**

**Mild-Slope en elements finits.**

**Aplicació al port de Barcelona.**

**711- TES- CA- 4964**

### Autor/a

**Laura Casas Gurri**

### Tutor/a

**Manuel Espino Infantes**

### Departament

**Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental**

### Intensificació

**Enginyeria Marítima**

### Data

**Juny de 2011**





# **Prediccions d'agitació portuària utilitzant un model Mild-Slope en Elements Finites. Aplicació al Port de Barcelona.**

Autora: *Casas Gurri, Laura*

Tutor: *Espino Infantes, Manuel*

**Paraules clau:** *agitació portuària, ressonància, Mild-Slope, sistema de predicció, CGWAVE, elements finits.*

L'agitació portuària és un fenomen que consisteix en l'oscil·lació de les ones que es troben dins del port. Cobra importància quan l'onatge incident té associat un període alt i una freqüència propera a la que tenen les estructures del port. Aquest fenomen, que afecta a escala global, pot produir moviments oscil·latoris violents de l'aigua semi-tancada i les seves conseqüències poden ser danys a les estructures o poden ocasionar problemes a l'operativitat del port, ocasionant un pèrdua de diners. Tenint en compte les prediccions de la mar i de l'agitació als ports, es poden evitar danys i donar garanties de seguretat als usuaris.

En aquesta tesina es presenta un sistema operacional de predicció de l'estat d'agitació del port de Barcelona. El treball presenta un programari numèric CGWAVE basat en les equacions de Mild-Slope. Aquest model és capaç de simular els principals fenòmens que ocorren en l'arribada de l'onatge al port i al seu interior amb un baix cost computacional.

Aquest model resol numèricament mitjançant el mètode dels elements finits. Per fer-ho és necessari la creació d'una malla, mitjançant la determinació del domini i la batimetria de la zona d'estudi. A més a més, el model requereix l'ajust de diversos paràmetres del port i de l'onatge incident. Paral·lelament, s'ha consultat les característiques de l'onatge de la zona de Barcelona per determinar el ventall de casos a simular.

Els resultats han estat validats amb dades obtingudes del mareògraf situat a l'interior del port i també han estat comparats amb els resultats d'un estudi d'agitació amb un model Boussineq. Els valors obtinguts són similars, lleugerament inferiors, als registrats pel mareògraf. Respecte la comparació dels models sembla que els dos models semblen tenir una bona solució per l'estudi d'agitació, però difereixen en alguns trams. Encara que els resultats són acceptables, s'ha tractat d'analitzar els possibles motius d'aquestes diferències en ambdues comparacions.

Per últim, s'ha desenvolupat una pàgina web que permet accedir l'usuari a la informació de l'estat de la mar de manera ràpida i senzilla. La plataforma creada permet visualitzar les dades a temps real, mitjançant les prediccions obtingudes de Previmer. S'ha creat un sistema que obté les dades de predicció que s'esperen a 24 hores vista, és capaç de processar-les i de buscar la simulació més aproximada i de mostrar-la per pantalla a l'usuari.



# Harbor agitation's prediction using a Mild-Slope model in Finite Elements. Application at Barcelona's Harbor.

Author: *Casas Gurri, Laura*

Thesis Director: *Espino Infantes, Manuel*

**Key words:** *harbor agitation, resonance, Mild-Slope, prediction system, CGWAVE, finite element method.*

Harbor agitation's is a phenomenon that consists in the oscillation of waves inside the harbor. This event becomes important when the incident waves have a high period and a frequency close to that of the harbor structures. This phenomenon, which affects harbors on a global scale, can produce violent oscillatory movement of the half-closed water and, as a consequence, could damage structures and cause operability problems, leading to an important loss of money. Thus, taking into consideration the predictions of the sea and agitation in harbors can prevent damage and provide security to users.

In the present thesis the author presents an operational system to predict the state of agitation at Barcelona's harbor. This work presents CGWAVE, a numerical software based on the Mild-Slope equations. This model is able to simulate the main phenomena that take place when the waves arrive to a harbor and inside of it with a low computational cost.

This model is solved numerically using the finite element method. To do this, is necessary to create a mesh by defining the domain and the bathymetry of the study area. In addition, the model requires the adjustment of various parameters of the harbor and the incident waves. In order to achieve this, we studied the characteristics of Barcelona's waves to determine the range of cases to consider and simulate.

The results were validated with data obtained from the mareograph, located inside the port, and have also been compared with the results of a study in Barcelona's harbor agitation based on a Boussineq model. The values computed by CGWAVE are similar, while slightly lower, than those registered by the mareograph. In comparison with Boussineq's model, both seem to have realistic solution for the problem of harbor agitation; however they differ in some areas. Although our results are still acceptable, we have attempted to analyze the possible reason for the differences in both comparisons.

Finally, a website has been developed to allow users the access to information on the sea conditions, in a quickly and easily way. The platform created allows displaying data in real time, using predictions obtained from Previmer. We have created a system that collects data for the next 24 hours, process it and shows the most appropriate simulation to the user.



# Índex

<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objectius</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Estat de l'art</b>	<b>5</b>
3.1	Fenòmens que pateix l'onatge en la seva propagació . . . . .	6
3.1.1	<i>Shoaling</i> . . . . .	6
3.1.2	Refracció . . . . .	7
3.1.3	Reflexió . . . . .	8
3.1.4	Difracció . . . . .	10
3.2	Dissipació de l'energia de l'onatge . . . . .	11
3.2.1	Fricció amb el fons . . . . .	11
3.2.2	Trencament d'ones . . . . .	12
3.3	Models de propagació de l'onatge . . . . .	12
3.3.1	Model de Raigs . . . . .	12
3.3.2	Models basat en l'equació <i>Mild-Slope</i> . . . . .	13
3.3.3	Models de Boussinesq . . . . .	15
3.3.4	Models Unificats . . . . .	16
3.4	Estat a Espanya . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Material i mètodes</b>	<b>19</b>
4.1	L'equació <i>Mild-Slope</i> . . . . .	19
4.1.1	Descripció del problema . . . . .	20
4.1.2	Formulació del model . . . . .	20
4.1.3	Condicions de contorn . . . . .	22
4.2	Elements Finitis . . . . .	24
4.2.1	Cas 1-Dimensional . . . . .	24
4.2.2	El cas general - 2-Dimensional . . . . .	27
4.3	Dades de l'onatge . . . . .	29
4.4	Port de Barcelona . . . . .	29
4.5	Software d'Aquaveo . . . . .	31

4.5.1	CGWAVE . . . . .	32
4.5.2	<i>Surface water Modeling Systems</i> . . . . .	32
4.6	Previmer . . . . .	33
4.7	Pàgina web . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Resultats</b>	<b>37</b>
5.1	Implementació . . . . .	37
5.2	Calibració . . . . .	43
5.3	Validació . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Sistema de predicció d'agitació portuària</b>	<b>51</b>
6.1	Descripció de la plataforma . . . . .	51
6.2	Esquema del sistema operacional . . . . .	52
6.3	Interfície resultant . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>64</b>
	<b>Apèndix A: Figures</b>	<b>65</b>
	<b>Apèndix B: Codi PHP de la plataforma</b>	<b>95</b>

# Índex de figures

3.1	Episodi d'agitació portuària a Puerto Vega (Astúries). Imatge extreta de [1]. . . . .	5
3.2	Efecte del <i>shoaling</i> en la propagació de les ones cap a la costa. Original extreta de [2]. . . . .	7
3.3	Fenomen del <i>Shoaling</i> . A l'esquerra vista en perfil de les profunditats, al mig vista en planta i a la dreta vista resultant de perfil. . .	7
3.4	Procés de refracció d'un front d'ones en una batimetria idealitzada. Original extreta de [3]. . . . .	8
3.5	Rangs de valors típics de coeficients de reflexió. Figura extreta de [4]. . . . .	9
3.6	Difracció de l'onatge causada per un dic impermeable . . . . .	10
3.7	Difracció de l'onatge causada per un dic impermeable, en 3 dimensions. Extreta de [5] . . . . .	11
4.1	Geometria del domini del problema . . . . .	20
4.2	Exemple de transects en el port de barcelona. . . . .	24
4.3	Funció sinus definida de 0 a $\pi$ . . . . .	25
4.4	Elements de la base $\gamma$ on es destaca l'element $\gamma_4$ . . . . .	25
4.5	Funció sinus representada en elements finits . . . . .	25
4.6	Solució obtinguda mitjançant elements finits (negre) i funció objectiu (vermell) . . . . .	27
4.7	Funcio $\gamma_i$ en el cas 2-Dimensional. Figura extreta de [6]. . . . .	28
4.8	Situació de les boies i el mareògraf . . . . .	29
4.9	Planta general del port de Barcelona . . . . .	30
4.10	Batimetria del port de Barcelona en metres . . . . .	31
5.1	Domini del port de Barcelona, el semi-cercle té un radi de 5959 metres i en total hi han 5197 Ha d'aigua . . . . .	38
5.2	Zoom en dues regions de la malla . . . . .	39
5.3	Zoom en dues regions de la malla . . . . .	39
5.4	Ventall d'angles incidents que s'han considerats . . . . .	40
5.5	Exemple de canvi de sistema de referència . . . . .	40

5.6	Transects en el port de Barcelona. Vista en planta . . . . .	41
5.7	Transects en el port de Barcelona. Vista de perfil . . . . .	41
5.8	Coefficients emprats en les diferents zones del port . . . . .	42
5.9	Cas $T=8.4$ segons $\theta=162^\circ$ $H_{interior}=0.08$ m. A l'esquerra vista general. A la dreta detall de la bocana i del punt d'estudi. . . . .	45
5.10	Cas $T=7.5$ segons $\theta=174^\circ$ $H_{interior}=0.15$ m. A l'esquerra vista general. A la dreta detall de la bocana i del punt d'estudi. . . . .	45
5.11	Comparativa entre els models CGWAVE i LIMPORT, $\theta=120^\circ$ . . .	46
5.12	Comparativa entre els models CGWAVE i LIMPORT, $\theta=50^\circ$ . . .	47
5.13	Vista dels coeficients d'agitació del port en diferents situacions de períodes i detall de l'entrada de la bocana. . . . .	48
5.14	Comparativa entre els models CGWAVE i LIMPORT, $\theta=180^\circ$ . . .	49
5.15	Estat d'agitació del port de Barcelona per un episodi amb un període de tempesta. . . . .	50
6.1	Esquema operacional que segueix la plataforma . . . . .	51
6.2	Esquema del sistema operacional . . . . .	53
6.3	Interfície final del sistema de predicció d'agitació portuària. . . . .	54



## Agraïments

Agraeixo la predisposició, les ganes de treballar i el tracte del meu tutor Manuel Espino que m'ha guiat durant aquests mesos de feina. També vull agrair als nois de SIMO, Jaime i Juan, per la seva ajuda en el tram final.

Gràcies a la família, en especial, als més propers pel recolzament mostrat durant tots aquests anys de carrera, i per les espelmes de la Iaia que han estat allà a tots els exàmens. Gràcies també a en Francesc per mostrar un recolzament incondicional i per obligar-me treure el millor de mi; sense tu, aquesta tesina no hagués estat possible. No vull deixar-me d'agrair als amics i companys que han fet que aquests anys hagin passat volant i hagin deixat uns bons records que no seran fàcils d'oblidar.



# Capítol 1

## Introducció

Des de la segona meitat del segle XX, el món ha entrat en una revolució: els països estan en creixement constant i el seu desenvolupament sembla no tenir fi. Els països, en matèria de mercat, semblen no tenir fronteres i la població es troba immersa en la globalització.

La societat de la qual formem part és consumidora de tota mena de recursos i cada cop és més exigent. El temps s'ha tornat una de les variables fonamentals a l'hora de prendre decisions i és una de les peces més valuoses en qualsevol sector en el què ens movem.

Les grans masses de matèries de tot tipus es traslladen de país en país o de continent en continent mitjançant els grans bucs. Fan rutes de manera contínua per tot el món i tenen establerts dies de descàrrega al llarg de les seves parades. És aquí on la tasca de la predicció cobra una importància primordial. La impossibilitat de descarregar en el port en l'horari previst, comporta una pèrdua de diners quantiosa. Hem de tenir en compte que aquest tipus de transport ha d'estar continuament en funcionament, ja que les parades no previstes suposen un increment addicional en el cost del transport.

Avui en dia, per la nostra manera de fer, estem acostumats a organitzar-nos avançant-nos als esdeveniments futurs, gràcies a les prediccions que cada cop més formen part de la nostra vida quotidiana. És per aquest motiu que en el camp de l'explotació portuària s'han fet cada cop més necessàries.

L'agitació portuària és un problema molt comú en els ports d'arreu del món que pot ocasionar riscos en la operativitat i en el trànsit en els ports. Aquest fenomen ve provocat per les oscil·lacions de les ones dins del port degut a molts factors diferents com poden ser la pròpia geometria del port o el clima marítim de la zona. Durant els episodis d'intensa agitació es poden produir danys per múltiples col·lisions tant a les estructures dels ports com a les embarcacions que es troben a recer en el seu interior.

El primer model de predicció es va emprar durant la Segona Guerra Mundial

amb fins bèlics. Aquest model era precari i poc acurat. Tractava de predir les altures d'ona. Posteriorment, amb el desenvolupament dels ordinadors i els models numèrics s'ha aconseguit representar l'onatge incident en els ports d'una forma més ajustada a la realitat, però de moment, amb un cost computacional massa elevat no viable pels recursos informàtics dels ports actuals.

En aquesta tesina es pretén presentar un model de predicció, CGWAVE, que permet analitzar l'onatge tot tenint en compte els diferents processos que pateix en la seva propagació i arribada al port. Com a cas d'ús, utilitzarem el port de Barcelona.

Barcelona, tradicionalment, des de molts segles enrere, ha estat una capital marítima i un referent per tota la mar Mediterrània. Des dels seus inicis, 2000 anys enrere, el port ha patit innumerables problemes degut als temporals i a d'altres processos naturals del mar. Això ha fet que l'home hagi estat continuament buscant solucions i que el port hagi anat modificant-se i creixent fins avui en dia. El port de Barcelona és un dels ports més importants del Mediterrani i s'ha consolidat com el port líder en creuers en aquest mar i el cinquè en tot el món. Si ho tenim en compte, és lògic que Barcelona necessiti les millors eines, ja que el port representa una eina clau de l'economia de la ciutat. I precisament per això, en aquesta tesina s'estudiarà un software diferent de l'usat fins ara en què es tractarà de veure si és millor i més acurat per tal de donar unes garanties més reals i adequades per millorar i predir l'operativitat del port.

En primer lloc, es revisaran els diferents models que s'han emprat fins a l'actualitat i que encara avui s'usen. A continuació es presentarà el model matemàtic i el model CGWAVE, on es descriuran punt per punt com s'ha treballat cada un dels elements que integren el programa. Tot seguit es parlarà de Previmer i el model de predicció i d'interfície que es presentarà. Per últim, es mostraran els resultats, una discussió dels mateixos comparant-los amb un model de predicció actual. Tot seguit, es mostrarà la plataforma de predicció de l'agitació de cara a l'usuari, i finalment, les conclusions.

# Capítol 2

## Objectius

Com a objectiu general i principal, s'ha fixat el desenvolupament d'un sistema de predicció d'agitació en el port de Barcelona. Per poder-ho assolir, s'ha estructurat l'estudi per passos marcant unes fites parcials que han permès encaminar la recerca per tal de poder desenvolupar i consolidar el sistema de predicció.

Els objectius parcials establerts han estat:

- Estudiar l'estat dels sistemes de predicció a Espanya, per a poder-ne fer una alternativa competitiva.
- Entendre els avantatges i limitacions que presenta el model CGWAVE.
- Crear una batimetria completa de la costa Barcelonina, integrant la batimetria disponible del Mediterrani amb la de l'interior del port.
- Definir acuradament la línia de costa del port de Barcelona, tenint en compte les noves obres i els diferents tipus de materials.
- Afinar els paràmetres d'entrada del CGWAVE mitjançant un procediment iteratiu d'execució.
- Simular un gran ventall de prediccions d'onatge, segons els episodis que rep el port.
- Validar les simulacions obtingudes amb dades reals extretes del mareògraf del port.
- Contrastar les simulacions obtingudes amb CGWAVE amb les simulacions obtingudes amb un model Boussinesq. Anàlisi d'avantatges i desavantatges.
- Desenvolupar el sistema de predicció.

Aquests objectius es desenvolupen en els següents capítols i es troben estructurats en: Estat de l'art (Capítol 3), material i mètodes (Capítol 4), resultats (Capítol 5), sistema de predicció d'agitació portuària (Capítol 6) i conclusions (Capítol 7).

# Capítol 3

## Estat de l'art

En aquest treball es pretén estudiar un programari que permeti predir l'agitació portuària. Però què entenem per agitació portuària?

Es tracta d'un fenomen que afecta als ports a escala mundial i les seves repercussions sinó es tenen en compte es poden saldar amb problemes d'inoperativitat i danys a les estructures amb costos importants per a l'administració i les asseguradores. L'agitació portuària, tal com el seu nom ho descriu acertadament, és l'oscil·lació de les ones que es troben dins del port. Cada port, igual que qualsevol estructura, té una freqüència natural d'oscil·lació. Quan un fenomen com per exemple el vent o les onades interactua amb l'estructura amb la mateixa freqüència, l'estructura entra en un episodi de ressonància. Si aquest es perllonga durant un període de temps, com podrien ser varies hores, l'estructura pot arribar al col·lapse. En el món de l'enginyeria, el fenomen de la ressonància va associat amb el clàssic exemple del pont de Tacoma (Washington, Estats Units). Aquest pont es va col·lapsar després que el vent entrés en ressonància durant hores. Per veure més informació [7].



Fig. 3.1: Episodi d'agitació portuària a Puerto Vega (Astúries). Imatge extreta de [1].

En l'enginyeria marítima concretament, la freqüència de les ones incidents pot coincidir amb la freqüència natural de l'interior del port i llavors es poden produir moviments oscil·latoris violents de l'aigua semi-tancada, provocant danys a les embarcacions com es pot veure a la Figura 3.1 i a les estructures i pot afectar seriosament a la funcionalitat del port. Aquest últim fet, representa una pèrdua de temps i de diners pels empresaris en no poder operar segons les seves previsions.

L'agitació ve donada per una sèrie de factors, i és important conèixer-los i tenir-los en compte a l'hora de projectar un nou port o de fer una remodelació. Principalment ve donada per les característiques del propi port (geometria, batimetria, tipus de contorn...) i per la zona on es troba ubicat, ja que hi influeix el clima marítim, la profunditat relativa d'on es troba el port situat, la proximitat de les platges, etc.

En aquest capítol, s'exposa de manera amena els principals fenòmens que afecten a la propagació de l'onatge i a l'agitació portuària. A continuació, es presenten els tipus de models que permeten simular l'estat d'agitació a les costes i als ports, especificant les seves limitacions i, finalment, es dona a conèixer l'estat del tractament de l'agitació a Espanya.

### **3.1 Fenòmens que pateix l'onatge en la seva propagació**

En la seva propagació cap a la costa, l'onatge pateix diferents processos que fan variar el seu estat físic i transformen la seva energia. De tots el processos, els més importants i amb una gran influència pel seu possible impacte, n'hi ha quatre: el *shoaling*, la refracció, la reflexió i la difracció que s'expliquen a continuació.

Els dos primers, el *shoaling* i la refracció, ocorren en el seu acostament a la platja. Els altres dos, la reflexió i la difracció, ocorren si durant el seu viatge cap a la costa es troben amb un obstacle (submergit o emergit).

#### **3.1.1 Shoaling**

El *shoaling* és el fenomen que pateix l'onatge quan avança cap a la costa des d'aigües profundes a mesura que el calat disminueix. L'efecte visible del *shoaling* és l'augment de l'alçada de les ones tal com es pot veure a la Figura 3.2.

L'explicació d'aquest fenomen, mitjançant el mètode de fluxos d'energia, és degut al fet que quan l'onada s'acosta a la costa es va frenant, perd velocitat per la notòria disminució del calat com es pot veure a la Figura 3.3 a l'esquerra. Per tant l'onatge perd energia cinètica que es converteix en energia potencial amb l'augment de l'alçada de l'ona. A continuació, es presenta aquest mètode per



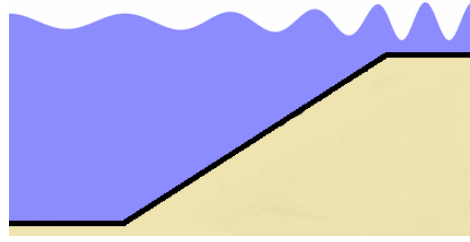


Fig. 3.2: Efecte del *shoaling* en la propagació de les ones cap a la costa. Original extreta de [2].

determinar les variacions de l'altura d'ona degut a aquest fenomen.

$$h_1 > h_2 \rightarrow c_1 = \sqrt{g \cdot h_1} > c_2 = \sqrt{g \cdot h_2}$$

Sabem que el flux d'energia s'ha de conservar, per tant

$$F_{E1} = F_{E2} \rightarrow E_1 \cdot c_1 \cdot S_1 = E_2 \cdot c_2 \cdot S_2$$

Considerem que no hi ha refracció ja que el front d'ones és paral·lel a la costa (Figura 3.3 central), i tenim

$$\left. \begin{array}{l} S_1 = S_2 \\ c_1 > c_2 \end{array} \right\} \rightarrow E_1 < E_2 \quad \text{on } E = \frac{1}{8} g c H^2 \rightarrow H_1 < H_2$$

Com s'ha pogut demostrar anteriorment, una onada més lluny de la costa tindrà una alçada d'ona menor, i a mesura que s'acosti aquesta anirà incrementant com es pot veure a la Figura 3.3 dreta. Una explicació més desenvolupada d'aquest fenomen es pot trobar a [5].

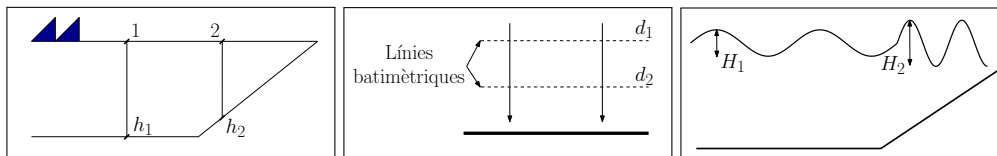


Fig. 3.3: Fenomen del *Shoaling*. A l'esquerra vista en perfil de les profunditats, al mig vista en planta i a la dreta vista resultant de perfil.

### 3.1.2 Refracció

La refracció és un fenomen que té lloc quan els fronts d'ona arriben a aigües poc profundes i que fa que aquests tendixin a orientar-se paral·lels a les isòbates (línies contínues que uneixen punts amb la mateixa profunditat). Com que a prop

de la costa la profunditat és petita, la velocitat de les ones només depèn del seu calat. Això fa que hi hagi unes ones del mateix front que vagin més ràpides que les altres fent que es vagin acostant les ones amb la mateixa velocitat, i fent que el tren d'ones tendeixi a posar-se paral·lel a les línies batimètriques.

Com es pot veure a la Figura 3.4, el punt A i B pertanyen al mateix front d'ona. Tal com s'ha explicat anteriorment, B tindrà una major velocitat que A, ja que està situat a un punt amb major profunditat, per tant, podem veure com B' haurà avançat més rapidament, tendint a que el front estigui més paral·lel a la batimetria. Aquest fet també origina un canvi en la direcció de propagació de l'onatge.

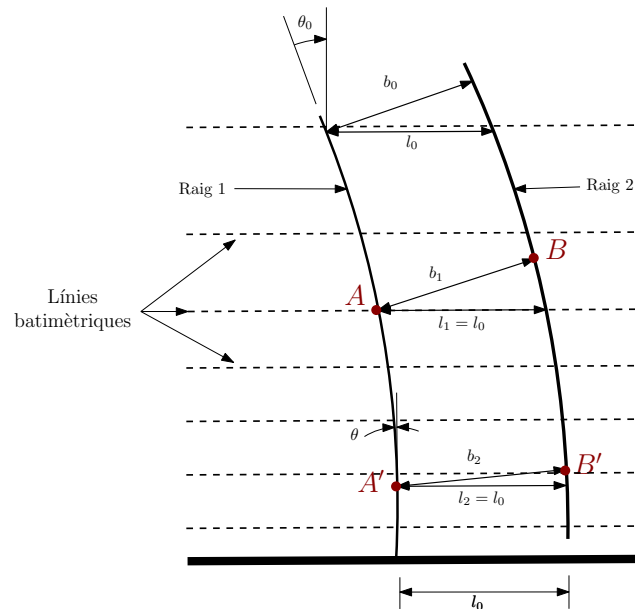


Fig. 3.4: Procés de refracció d'un front d'ones en una batimetria idealitzada. Original extreta de [3].

### 3.1.3 Reflexió

La reflexió és un fenomen que ocorre quan una ona es troba amb un obstacle en el seu camí, amb una disminució sobtada de la profunditat del fons marí, o quan l'onatge es propaga en una platja amb pendent pronunciada. Aquesta ona, i la seva energia, es veu modificada i pot patir dissipació, transmissió o bé reflexar-se. Generalment, aquesta modificació es pot donar per més d'un.

La reflexió depèn de la pendent de l'obstacle amb el que es trobi, de si és rígid, permeable o impermeable i de la seva rugositat. Per exemple, si un tren

d'ones colisiona amb un dic totalment vertical, rígid, impermeble i totalment llis (sense rugositat), l'ona reflexada serà igual que la original, tota la seva energia es reflexarà, en sentit contrari. A mesura que les característiques dels obstacles (dic vertical, dic escollera...) són diferents l'energia reflexada és menor.

El mateix passa quan l'onatge arriba a una platja amb pendent. Si aquesta és pronunciada, l'onatge patirà una reflexió de la seva energia a mesura que la pendent sigui menor, disminuirà la reflexió i hi haurà una major dissipació per trencament. Aquesta energia de l'ona es transformarà en energia potencial d'erosió del sediment de la platja.

El coeficient de reflexió es defineix com:

$$K_{\text{Reflexió}} = \frac{H_{\text{Reflectada}}}{H_{\text{Incident}}}$$

on les H són altures d'ona.

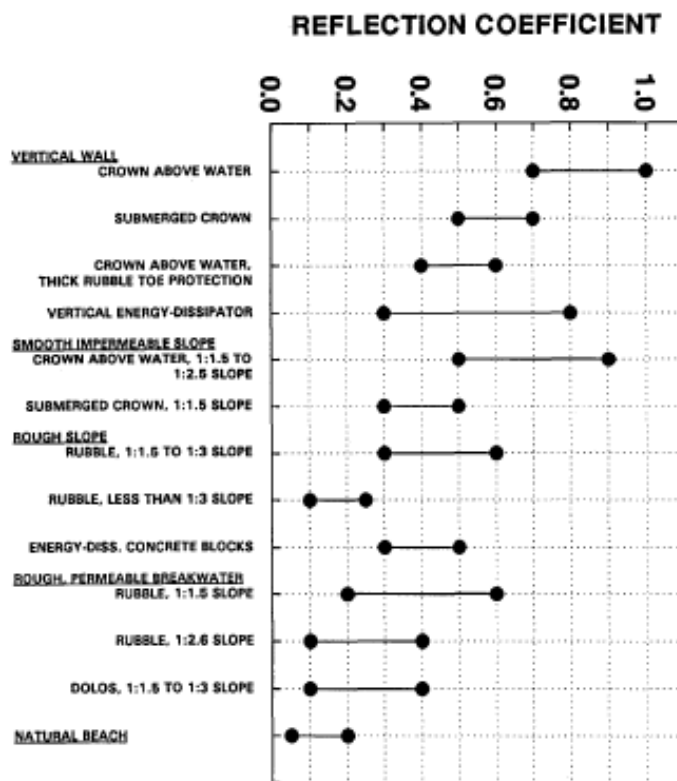


Fig 3.5: Rang de valors típics de coeficients de reflexió. Figura extreta de [4].

El coeficient  $K_{\text{Reflexió}}$  depèn de la pendent, de la rugositat, de la permeabilitat de la superfície reflexant, del peralt de l'ona i de l'angle d'incidència. Aquest

coeficient ja ha estat tabulat a la bibliografia. Existeixen taules directes com la que es mostra a la Figura 3.5 extreta de [4] o una expressió tabulada [8] basada en el paràmetre d'Iribarren [9].

### 3.1.4 Difracció

Aquest fenomen es dona quan un tren d'ones es troba en el seu camí un obstacle. Llavors, existeix un gradient d'alçades al llarg d'una mateixa cresta i per tant hi ha una difusió lateral d'energia, d'on hi ha més energia a on n'hi ha menys. Aquesta colisió amb l'obstacle fa que hi hagi una perturbació del moviment de l'onatge i que per tant aparegui aquesta difusió de l'energia. Les ones formades darrera de l'obstacle són les ones difractades que es poden veure en les Figures 3.6 i 3.7. Quan això passa, aquest tren d'ones es reorienta afectant l'altura de les ones i patint transformacions.

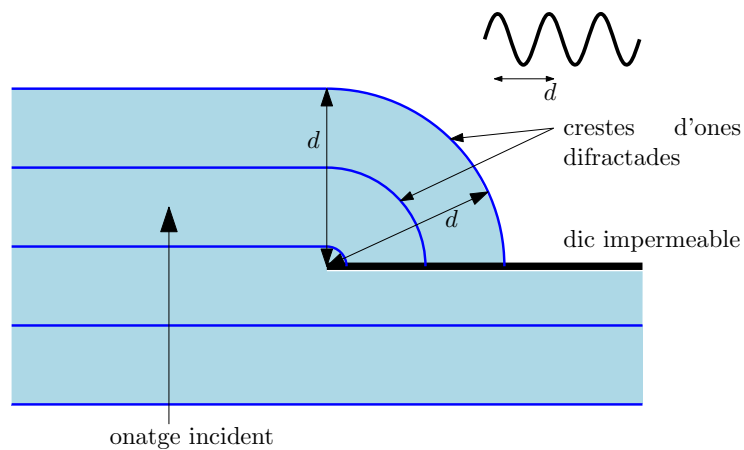


Fig. 3.6: Difracció de l'onatge causada per un dic impermeable

Es pot definir el coeficient de difracció com:

$$K_{Dif} = \frac{H_{Dif}}{H_{incident}}$$

Aquest coeficient es troba parametritzat en diverses gràfiques a [10].

La difracció va ser primerament estudiada en els raigs de llum per Sommerfeld [11], posteriorment aquesta feina va ser extesa a altres tipus d'ones. Per aprofundir més en aquest fenomen veure [5].

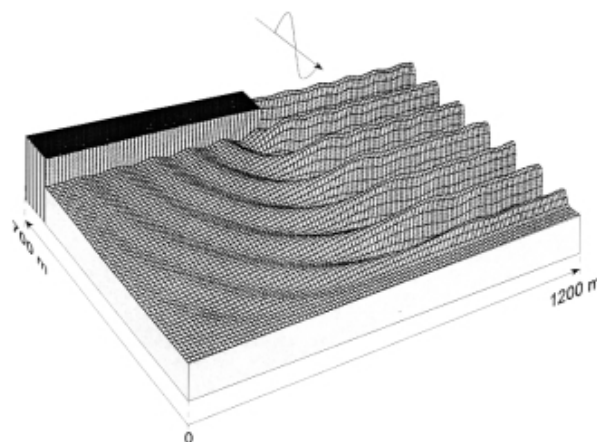


Fig. 3.7: Difracció de l'onatge causada per un dic impermeable, en 3 dimensions. Extreta de [5]

## 3.2 Dissipació de l'energia de l'onatge

A mesura que l'onatge arriba a la costa i les profunditats van disminuint, l'efecte del fons es fa notori i provoca una dissipació d'energia de l'ona. A més a més, quan l'ona ja es troba molt a prop de la costa i la profunditat és petita, l'onatge com a conseqüència del *shoaling* es torna inestable i s'acaba trencant, provocant una dissipació important d'energia. En les proximitats del port, i a l'interior, l'onatge pateix la dissipació de la seva energia, una part per la fricció i l'altra, per alguns grups d'ones inestables, per trencament.

### 3.2.1 Fricció amb el fons

La dissipació de l'energia, degut a la fricció de l'onatge amb el fons marí, està relacionada amb la profunditat sobre la qual es mouen i també amb la distància recorreguda. Segons aquestes dues variables, la dissipació serà més o menys important. Si la distància recorreguda és curta i no es té en compte la dissipació causada pel fons, els resultats que s'obtenen tendeixen a sobrevalorar l'alçada de l'ona.

La dissipació de l'onatge és degut a la formació de la capa límit en el fons. En aquesta capa, el fluid acostuma a ser turbulent i, la dissipació de l'energia és tan sols l'esforç de l'onatge per mantenir la turbulència dins de la capa límit. Una descripció analítica d'aquest fenomen es pot trobar a [12].

### **3.2.2 Trencament d'ones**

Aquest fenomen es dona quan l'onatge en la seva arribada a la costa, va augmentant d'alçada. En incrementar-se i disminuir la seva longitud d'ona, el peralt de l'ona experimenta un creixement. El trencament d'ones es produeix quan aquest peralt assoleix un valor limitat que depèn de la profunditat on es trobi i de la pendent de la platja. L'onatge quan es torna inestable és quan trenca i dissipa l'energia. Un resum dels models de trencament d'ones es pot trobar a [5].

## **3.3 Models de propagació de l'onatge**

A continuació es presenten els models que fins l'actualitat s'han emprat o que actualment estan en ús que permeten simular la propagació de les onades cap a la costa. Concretament, avui en dia, per l'estudi i modelatge de l'agitació a l'interior dels ports s'utilitzen models basats en equacions Mild-Slope o Boussinesq, que són els que resolten de manera més propera a la realitat. De tots els mètodes existents, es comentarà quins són els seus principis, les seves limitacions i les seves aplicacions. Per aprofundir més en els models es pot consultar [8, 1].

### **3.3.1 Model de Raigs**

Aquest tipus de models van ser els pioners en l'estudi de la propagació de l'onatge. Això fa que siguin els més senzills i amb solucions més austeres. Però són importants per establir la teoria en què es basen els mètodes de resolució més elaborats que es veuran a continuació.

El model de raigs està basat en la teoria de raigs utilitzant ones infinitesimals que es propaguen per una batimetria. Degut a la infinitesimalitat es pot suposar que la batimetria varia suaument en comparació amb la longitud d'ona local. Per resoldre el problema, primer de tot, es calcula el vector de nombre d'ona  $i$ , tot seguit, s'utilitza per a calcular els raigs mitjançant geometria; el raig és tangent al vector de nombre d'ona. Finalment, es calcula l'envolvent de l'ona al llarg dels raigs calculats tenint en compte el principi de conservació de l'energia. Tal i com es pot entendre, el nombre de càlculs necessari per resoldre el problema depèn només de la complexitat de la batimetria.

Al tractar-se d'un mètode senzill que presenta limitacions importants de cara a la modelització de l'onatge. Aquest model no té en consideració els fenòmens de reflexió i difracció i té certes mancances a l'hora de considerar la refracció ones-corrents i el trencament d'ones.

### 3.3.2 Models basat en l'equació *Mild-Slope*

L'equació de pendent lleu, en anglès anomenada Mild-Slope Equation (MSE), és una equació diferencial de l'àmbit de la dinàmica de fluids que va ser derivada per primera vegada per Eckart el 1952 [13] i desenvolupada novament per Berkhoff [14, 15]. Aquesta, va suposar una millora de la teoria de raigs existent ja que introdueix una teoria per dues dimensions.

L'equació de la pendent lleu en la seva forma més simple és pot escriure com:

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \Phi) + \omega^2 \frac{C_g}{C} \Phi = 0$$

on:

$\nabla$  és l'operador gradient.

$C(x,y)$  és la velocitat de fase

$C_g(x,y)$  és la velocitat de grup

$\Phi$  és el potencial de velocitats

$\omega$  és la freqüència angular absoluta.

En parlarem amb més detall i aprofundint més en 4.1.

Aquesta equació és de tipus elíptica i té en compte els fenòmens de la reflexió, la refracció i la difracció. Tot i això, com s'explica posteriorment, es pot tenir en compte també la dissipació d'energia deguda a la fricció amb el fons i el fenomen del trencament d'ones.

L'equació de Berkhoff [14] s'ha resolt de múltiples maneres generant diferents aproximacions, originant una classificació de models segons la manera en com s'ha arribat a l'arrel del problema.

#### Models Elíptics

Aquests tipus de models es basen en la resolució de manera directa de l'equació 4.1. S'utilitza bàsicament per a la resolució en recintes tancats o semi-tancats, com per exemple una badia. Té aquesta limitació ja que el model necessita plantejar condicions de contorn en tota la corba del domini i resulta complicat en dominis on hi ha una platja ja que el fenomen de la reflexió és gairebé inexistent i aquesta situació no està contemplada per a la formulació matemàtica.

Aquest tipus de model és apte per escenaris amb pendents de fins a 1:3 [16]. Una de les principals limitacions del model és l'elevat cost computacional, ja que és necessari per a la resolució que el nombre de nodes per longitud d'ona sigui major o igual a quinze.

### **Models Parabòlics**

Aquest model és el resultat de l'aplicació de l'aproximació parabòlica al càlcul de la propagació de l'onatge que es va dur a terme als anys 70. La principal idea del model és simplificar l'equació 4.1 en una equació de tipus parabòlica en la direcció predominant de propagació de l'onatge. És per aquest motiu que per a la resolució és fonamental conèixer o establir la direcció principal de propagació d'aquestes.

En l'aproximació de l'equació en la forma parabòlica, s'assumeixen dues hipòtesis importants: es desprecia la component reflexada del potencial de velocitats i el fenomen de la difracció es dona només en la direcció perpendicular a la direcció principal de propagació.

Les principals aplicacions d'aquest model són la propagació de l'onatge de mar obert fins a la costa i l'estudi de l'onatge en la zona de trencament.

El model parabòlic representa una disminució significativa del temps de càlcul respecte al model parabòlic, per la resolució és necessari que el número de nodes per longitud d'ona sigui major o igual a 10, 15 per elíptic. Tot i això, l'àmbit d'aplicació d'aquest model és més restrictiu ja que la limitació de l'angle d'incidència és important.

### **Models Hiperbòlics**

Aquests models intenten resoldre de manera més eficient el problema parabòlic de l'equació Mild-Slope hiperbolitzant-lo. El mètode més habitual per resoldre problemes hiperbòlics és amb mètodes iteratius; parteixen d'una situació inicial i en calculen de transitories fins arribar a un estat estacionari.

Els models hiperbòlics són computacionalment més eficients però presenten tres limitacions principals. La primera és que cal tenir molts nodes per longitud d'ona ( $\geq 10$ ), el segon és que l'amplitud i la fase han de ser deduïts a posteriori i l'última és que ha de complir la condició de Courant-Friedrichs-Lewy [17, 18].

Les principals aplicacions d'aquest model són la propagació de l'onatge dins de ports, l'anàlisi de ressonàncies i la transformació de l'onatge a la zona de trencament, sobretot aquest últim ja que és molt fàcil la implementació de fenòmens de dissipació d'energia.

### **Models Energètics**

Aquests models es basen en la resolució de les equacions de govern [19]. Aquestes equacions es basen en la versió elíptica de la Mild-Slope. Aquest tipus de models obtenen la direcció de l'onatge, basant-se en la irrotacionalitat del vector número d'ona, i obtenen l'alçada de l'ona, basant-se en el principi de conservació de l'acció de l'onatge.



Els models energètics tenen la particularitat que no resolen la superfície lliure, i descriuen l'onatge en termes d'alçada d'ona, direcció i període en cada punt del domini computacional. Aquest models són especialment indicats per problemes on actuin fenòmens com el *shoaling*, la refracció i la difracció ja que ho resolen amb un cost computacional molt baix. També resolen de manera senzilla i molt solvent el trencament d'ones i la fricció de fons ja que són fenòmens que són fàcils d'introduir en aquest model. No tenen limitació respecte l'angle d'incidència, ni el nombre de nodes per longitud d'ona.

L'inconvenient d'aquest model és que no és capaç de resoldre la reflexió. Aquests models són utilitzats en circulació costanera [20] i en modelatge Hidromorfodinàmic [21].

### 3.3.3 Models de Boussinesq

Les equacions de Boussinesq van ser desenvolupades per Boussinesq [22] per calcular la propagació d'una ona unidireccional sobre un fons horitzontal en aigües poc profundes.

Posteriorment, Peregrine [23] assumint algunes hipòtesis va derivar les equacions de Boussinesq per un fons amb pendent variable i en funció del temps.

$$\left. \begin{aligned} \eta_t + \nabla \cdot [(\eta + h) \cdot \vec{u}] &= 0 \\ \vec{u}_t + \frac{1}{2} \nabla |\vec{u}|^2 + g \nabla \cdot \eta + \frac{h^2}{6} \nabla (\nabla \vec{u}_t) - \frac{h}{2} \nabla (\nabla \cdot (h \vec{u}_t)) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

on  $\vec{u}$  és la velocitat promig en vertical,  $\eta$  és l'elevació de la superfície lliure,  $h$  és la profunditat,  $g$ , la gravetat i el subíndex  $t$  indica la derivada respecte el temps.

Es tracta de resoldre un sistema de dos equacions amb dues incògnites: l'elevació de la superfície lliure i la velocitat horitzontal del fluid. Les hipòtesis assumides per resoldre en fons variable, dispersió freqüencial i no lineal dèbils fa que aquestes equacions no siguin vàlides en dominis amb profunditats molt petites ni en profunditats indefinides on aquestes assumpcions no són correctes.

Les equacions de Boussinesq estan limitades pel fet que la profunditat ha de ser menor que un cinquè de la longitud d'ona per a que siguin vàlides i també poden ser inestables quan en la resolució impliquin una longitud d'ona semblant a la mida de la malla.

Per estendre l'ús d'aquestes equacions a profunditats majors, s'hi han introduït modificacions en la seva formulació que ha permès que siguin vàlides des de la propagació en aigües on la profunditat és indefinida fins a profunditats petites. Per veure més detall [24, 25, 26].

Aquesta formulació modera acuradament els fenòmens físic de la refracció, el *shoaling*, la difracció i la reflexió. A més a més, si és necessari es poden variar per a que també modela el trencament d'ones [27] i la fricció de fons [28, 29].

### 3.3.4 Models Unificats

Els models basats en Boussinesq tenen uns resultats satisfactoris en les seves simulacions, però tot i això tenen una limitació important degut a la hipòtesi de dèbil linealitat. Aquesta afecta sobretot quan l'onatge es veu afectat per l'efecte del *shoaling*, ja que l'ona augmenta d'alçada de manera notòria i la relació entre aquesta alçada i la profunditat té uns valors massa grans per l'aproximació de Boussinesq.

Per solucionar aquest problema es tracta d'eliminar la hipòtesi de dèbil linealitat [30, 31], ja que la millor manera és modelar amb equacions no lineals. Eliminant aquesta dèbil linealitat, les equacions resultants no poden ser considerades de Boussinesq, ja que no compliria amb la hipòtesi de la dispersió freqüencial que és l'essència de l'aproximació de Boussinesq.

Aquestes equacions no lineals, anomenades unificades, es troben descrites detalladament a [32].

## 3.4 Estat a Espanya

Des de l'any 2000 aproximadament, a l'estat espanyol s'estan fent una tasca de recopilació, processament de dades i distribució de la informació. L'organisme de Puertos del Estado ha desenvolupat el projecte SAPO (Sistema Autónomo de Predicción de Oleaje) [33, 34] que té com a objectiu donar un servei de predicció local a les Autoritats Portuàries que el sol·licitin i també mostrar informació al públic general.

SAPO és un sistema capaç d'obtenir dades de predicció a 48 hores vista. Actualment, el model, en desenvolupament continu, ofereix una predicció cobrint uns  $600 \text{ km}^2$  amb un model de generació d'onatge i les zones interiors dels ports amb un model d'agitació.

Puertos del Estado treballa conjuntament amb el Instituto de Nacional de Meteorología (INM) en un conveni establert [33]. Per una banda, INM s'encarrega de dur a terme l'explotació operativa del sistema d'informació meteorològica marina i també del sistema de predicció numèrica de la generació de l'onatge i transmet totes aquestes dades a Puertos del Estado. Puertos del Estado per la seva part, posa a disposició a INM de tota les dades necessàries a temps real i diferit.

Amb tota aquesta informació de predicció d'onatge, el projecte SAPO entra en joc. El sistema a prop de la costa ha de tenir en compte els fenòmens explicats anteriorment a 3.1. Per tant, es necessita una malla més acurada a prop de la costa i un model numèric de propagació d'onatge.

Els sistemes de predicció locals s'instalen a cada autoritat portuària sol·licitant i són ells qui en gestionen l'aplicació. SAPO treballa amb un programari de

propagació fins la costa anomenat SWAN [35] i per la predicció local en els ports amb un model basat en les equacions de Boussinesq 3.3.3.

Com es tracta d'un projecte en desenvolupament, encara està en línies de recerca, buscant el model d'implementació que millor s'ajusti a cada cas. És per aquest motiu pel qual aquí s'estudiarà un model basat en les equacions Mild-Slope per mirar de donar una millor resposta, si és possible.

En el cas concret de Barcelona, les dades de Puertos del Estado són processades i es fa servir un model basat en les equacions de Boussinesq per la predicció. A la pàgina web [36] es pot veure la interfície i les prediccions que actualment s'usen.



# Capítol 4

## Material i mètodes

En aquest capítol es mostren i s'expliquen els diferents elements que permeten resoldre el problema de l'agitació en el port de Barcelona: des del tipus d'equació i el mètode de resolució fins als elements auxiliars com són les boies, que han ajudat a la calibració per un desenvolupament correcte i una posterior validació dels resultats.

### 4.1 L'equació *Mild-Slope*

L'equació de pendent lleu, en anglès anomenada Mild-Slope Equation (MSE), és una equació diferencial de l'àmbit de la dinàmica de fluids que va ser derivada per primera vegada per Eckart el 1952 [13] i desenvolupada novament per Berkhoff [14, 15]. Aquesta equació diferencial modela els fenòmens de difracció i refracció de l'onatge.

La formulació d'aquest model ha anat evolucionant amb el temps. Des de les primeres formulacions on només es podien modelar regions amb un pendent lleuger, d'on prové el seu nom, [13, 14] fins a les formulacions actuals que permeten modelar els efectes de les ones a l'interior dels ports [37, 38, 39].

En aquesta secció es pretén donar una explicació més detallada de la formulació que s'utilitza en el present treball. En el primer apartat 4.1.1 es mostra un esquema de la geometria del problema i de les seves condicions de contorn. Tot seguit, a 4.1.2, es fa un desenvolupament analític de l'equació i de les condicions de contorn, ensenyant totes les simplificacions que possibiliten la seva resolució. Finalment, a l'apartat 4.1.3, es dona una breu explicació del mètode numèric que s'utilitza per a trobar la solució de l'equació diferencial.

### 4.1.1 Descripció del problema

Les funcions que satisfan l'equació MSE aproximen l'alçada de les ones. Com tota equació diferencial ha de tenir un domini de definició en el qual s'imposen un seguit de condicions, les anomenades de contorn. En el cas de l'equació MSE, el domini de definició és la massa d'aigua sobre la qual es vol estudiar l'efecte de les ones. A la Figura 4.1 es mostra un esquema de la geometria del domini. Clarament es pot apreciar a l'esquema que hi ha dos tipus diferents i diferenciats de contorns: mar obert i costa.

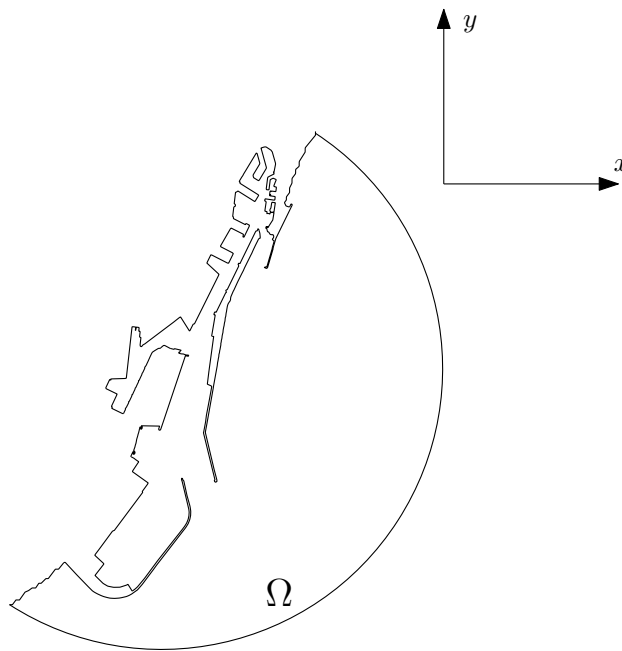


Fig. 4.1: Geometria del domini del problema

### 4.1.2 Formulació del model

L'equació de pendnet lleu és una equació el·líptica dos dimensional. En la seva formulació més simple es pot escriure com (4.1).

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + k^2 C C_g \phi = 0 \quad (4.1)$$

Els paràmetres de (4.1) són:

$\phi(x,y)$  = funció complexa d'elevació de la superfície ( $\phi_1 + i \phi_2$ ).

$$i = \sqrt{-1}.$$

$\sigma$  = freqüència de les ones

$C(x, y)$  = velocitat de fase ( $\sigma/k$ )

$C_g(x, y)$  = velocitat de grup ( $\partial \sigma / \partial k = n C(c, y)$ )

on:

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

$k(x, y)$  = nombre d'ona ( $2\pi/L$ ) relacionada amb la profunditat local  $d(x, y)$  mitjançant la relació de dispersió:  $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ .

Un cop s'ha resolt l'equació diferencial (4.1) s'obté una funció d'elevació de superfície  $\phi$ , que es pot utilitzar aquesta per trobar l'alçada d'una ona mitjançant la relació:

$$H = \frac{2\sigma}{g} \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2}$$

L'equació (4.1) és capaç de simular el problema general de dispersió de l'onatge: la refracció, la difracció i la reflexió. Tot i això, hi ha alguns fenòmens molt importants que ocorren a les costes i que aquesta formulació no té en compte. Per exemple, la dissipació per fricció ocasionada pel fons marí [40, 41, 42]. Aquest fenomen es pot afegir a la formulació de (4.1) afegint un factor de fricció  $w$ . Amb aquest paràmetre la formulació esdevé (4.2).

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + (k^2 C C_g + i\sigma w) \phi = 0 \quad (4.2)$$

El factor de fricció  $w$  es defineix com:

$$w = \frac{2n\sigma}{k} \left[ \frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (4.3)$$

on  $a = H/2$  és l'amplitud de l'onatge i  $f_r$  és un coeficient de refracció definit pel port. On  $n$  és el coeficient de dissipació de Manning. El coeficient  $f_r$  depèn del nombre de Reynolds i de la duresa del fons marí i es poden obtenir a [40, 43].

Un altre fenomen que succeeix en zones costaneres i que no està contemplat en (4.1) és el trencament d'ones [44, 45], així es pot resoldre afegint el paràmetre  $\sigma$  de trencament d'ones. Aquesta nova formulació esdevé:

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + (k^2 C C_g + i\sigma C_g \gamma) \phi = 0 \quad (4.4)$$

L'equació per  $\gamma$  és:

$$\gamma = \frac{\chi}{d} \left( 1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right) \quad (4.5)$$

on  $\chi$  i  $\Gamma$  són constants definides empíricament, un valor estàndard per  $\chi$  es 0.15 [44].

Ambdós termes, fricció i trencament, es poden afegir a l'equació original de la MSE (4.1), obtenint la versió més general (4.6) usada per resoldre el problema de l'equació del pendent lleu [46].

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + (k^2 C C_g + i C_g \sigma_w + i \sigma C_g \gamma) \phi = 0 \quad (4.6)$$

### 4.1.3 Condicions de contorn

Al llarg de la costa i dels objectes amb superfícies reflectants, tradicionalment [15] s'ha utilitzat la condició de contorn (4.9) on:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \alpha \phi \quad (4.7)$$

on  $n$  és la direcció normal al contorn i  $\alpha$  és un factor de reflexió definit com

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (4.8)$$

on  $K_r$  varia entre el 0 i 1, valors específics per diferents superfícies es troben a [4] i es poden veure a la Figura 3.5.

Per tant la condició de contorn esdevé:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik(2\phi_i - \phi) \quad (4.9)$$

Les condicions de contorn a mar obert requereixen definir una ona incident  $\phi_i$ , a més a més, cal tenir en compte que hi ha ones que poden provenir de dintre del domini degut a les reflexions descrites previament. Per tenir en compte tots aquests casos diferents, es separa la reflexió en dos:  $\phi_r$  que és la ona que es reflectaria en cas que no existís el port i  $\phi_s$  la ona que es reflexa degut al port (i que per tant ha de satisfer l'equació de radiació de Sommerfeld [11]).

Aquestes ones es poden descriure com:

$$\phi_i = A_i e^{ikr \cos(\theta - \theta_i)} \quad (4.10)$$

$$\phi_r = A_i e^{ikr \cos(\theta + \theta_i)} \quad (4.11)$$

$$\phi_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad (4.12)$$

on  $(r, \theta)$  són les coordenades d'un punt en forma polar,  $A_i$  i  $\theta_i$  és la definició de la ona incident,  $H_n$  és la funció de Hankel de primera espècie i ordre  $n$ , i  $A_n$  i  $B_n$  són coeficients desconeguts.

Donades aquestes formulacions de la condició de contorn, el problema es pot cercant funcions pròpies. Tot i això, està demostrat [47], que només es pot trobar solució si s'assumeixen dues hipòtesis:



1. La regió externa al model ha de tenir una profunditat constant.
2. La costa de fora del port ha de ser completament reflectiva i colineal.

El problema rau en què, en casos normals, cap de les dues hipòtesis es compleixen. Per exemple, normalment la batimetria és irregular i la profunditat s'incrementa en direcció oposada a la costa, per tant la primera hipòtesi no es satisfà. Per solucionar aquest problema, historicament s'havia de "jugar" seleccionant profunditats representatives i analitzant com es comporta la solució. Aquest procés és clarament costós en l'àmbit temporal. Tot i això, aquesta solució no té en compte la pendent de la costa exterior. La segona condició també pot portar problemes pel fet que no sempre la costa exterior és completament reflectant. Assumir el contrari pot portar a afegir ones falsament reflectides per la costa a la solució.

Hi ha diverses variants per a solucionar aquests problemes [48], en aquest treball es descriu la solució utilitzada a [46]. Aquesta alternativa utilitza una aproximació semi-parabòlica per a descriure  $\phi_s$ :

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -p\phi_s - q\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial \theta^2} \quad (4.13)$$

on,

$$\begin{aligned} p &= -ik_0 + \frac{1}{2r} - \frac{i}{8k_0r^2} \\ q &= -\frac{i}{2k_0r^2} \end{aligned}$$

En aquestes equacions  $k_0$  es pot entendre com el nombre d'ona corresponent a la profunditat mitja a la frontera de mar obert de la geometria. Aquesta aproximació de  $\phi_s$  no satisfà rigorosament les equacions de Sommerfeld [11] però separa la seva resolució de  $\phi_i$  i  $\phi_r$ .

Per calcular  $\phi_i$  i  $\phi_r$  es pot prendre un compromís entre el fet de que la profunditat a l'exterior varia i la hipòtesi que és constant. Per això, es treballa en transects 1-dimensionals [49], talls perpendiculars a la costa de la batimetria, es pot veure un exemple a la Figura 4.2. Aquesta direcció és raonable degut a què, normalment, és la que més fa augmentar la profunditat.

Aquesta equació 1-dimensional té per equació:

$$\frac{d}{dx} \left( CC_g \frac{d\psi}{dx} \right) + kCC_g (k \cos^2 \theta + iw) \psi = 0$$

on, a la geometria 1-dimensional

$$\phi_0 = \psi(x) \exp(iky \sin \theta)$$

Un cop s'ha resolt  $\phi_0 = \phi_i + \phi_s$  per a ambdós transects, els valors dels transects es poden transportar (mitjançant translacions i interpolacions) per a cobrir el semicercle.

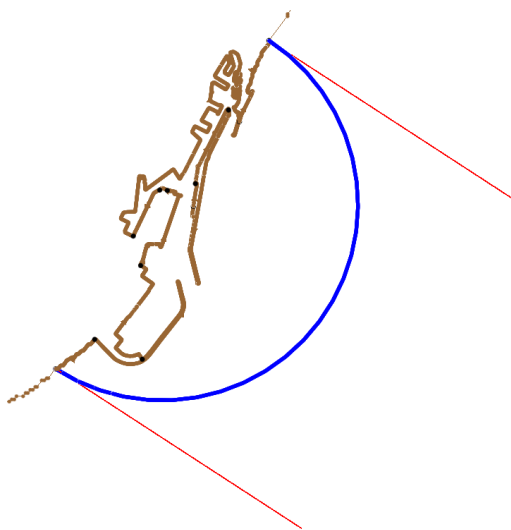


Fig. 4.2: Exemple de transects en el port de barcelona.

## 4.2 Elements Finites

Els elements finits són un mètode de resolució d'equacions diferencials en derivades parcials. El software utilitzat en aquesta tesina resol utilitzant aquest mètode i és per aquest motiu que a continuació es dóna una breu introducció al mètode dels elements finits per tal que el lector pugui entendre com s'ha arribat als resultats finals de les simulacions.

Primer de tot, el que fa el mètode és aproximar els valors de la funció desconeguda sobre un conjunt de punts. Aleshores la funció desconeguda és aproximada mitjançant la interpolació polinòmica d'aquests valors. Per entendre el que s'acaba d'explicar i les bases del mètode es presenta tot seguit un exemple en una dimensió. El cas de la funció Sinus.

### 4.2.1 Cas 1-Dimensional

Per poder representar la funció Sinus amb elements finits, primer de tot, és necessari definir una eina que ens permetrà arribar a la solució, l'spline lineal. Aquest s'utilitza per aproximar la funció objectiu (en aquest cas la funció sinus) a partir del seu valor en un conjunt finit de punts.

Es defineix que la funció va de 0 a  $\pi$  i prendrem com a dades exactes el seu valor en punts equiespaiats cada  $\pi/8$ .

Com es pot veure a la Figura 4.3 en aquest cas coneixem el valor exacte a cada  $\pi/8$ , però a priori no coneixem com van units aquests punts coneguts. És aquí on l'eina de l'spline és necessària.

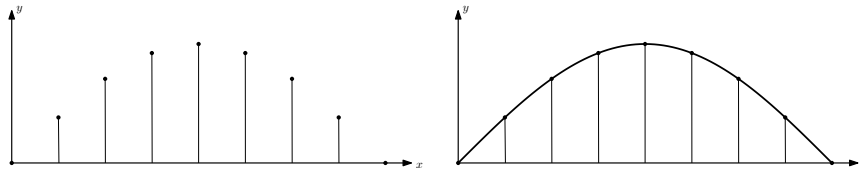


Fig. 4.3: Funció sinus definida de 0 a  $\pi$

### Spline lineal

L'objectiu és reconstruir la funció sinus. La forma més directe i natural és unir els punts contigus mitjantsant segments. Aquests segments són línies rectes definides a trossos i, analíticament, el seu procés geomètric s'escriu com:

$$f(x) = \sum_{i=0}^8 u_i \gamma_i(x)$$

on  $u_i = \sin(x_i)$  és el pes i  $\gamma_i(x)$  és una funció definida a trossos que satisfà  $\gamma_i(x_j) = \delta_{ij}$ . En l'exemple de la Figura 4.4 es poden veure les funcions  $\gamma_0, \gamma_2, \gamma_4, \gamma_6$  i  $\gamma_8$ . És necessari assignar-hi un pes diferent per poder representar la funció sinus, l'objectiu es obtenir la gràfica de la Figura 4.5.

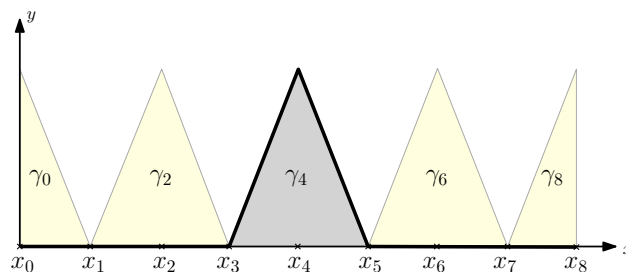


Fig. 4.4: Elements de la base  $\gamma$  on es destaca l'element  $\gamma_4$

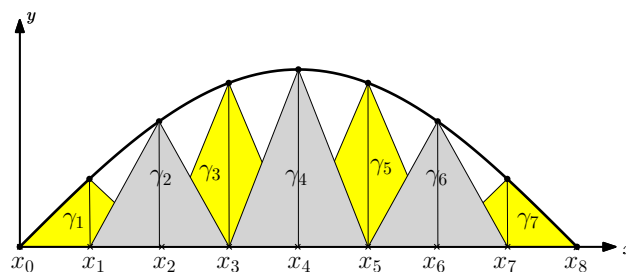


Fig. 4.5: Funció sinus representada en elements finits

La intenció d'aquest subapartat era mostrar que tota funció, en aquest cas 1D, es pot expressar com a combinació lineal d'elements  $\gamma_i$ . A continuació, es tractarà de mostrar com es troben els coeficients de la combinació lineal per trobar la funció que resolgui l'equació diferencial.

### Resolució de l'exemple

Donat el problema

$$\begin{cases} u''(x) = -u(x) \\ u(0) = u(\pi) = 0 \end{cases}$$

on clarament el sinus és la solució, es tracta de veure com una versió 1-dimensional del mètode d'elements finits pot resoldre aquest problema.

Primerament, utilitzarem la mateixa partició de l'espai i escriurem  $u(x)$  com

$$u(x) = \sum_{i=0}^8 u_i \gamma_i(x)$$

En aquest cas els  $u_i$  són desconeguts a priori. Tot i així, gràcies a l'enunciat del problema, ja podem dir que  $u_0 = 0$  i  $u_8 = 0$ .

El primer pas és convertir el problema a la seva forma dèbil:

$$-\int_0^\pi u(x)v(x) dx = \int_0^\pi u''(x)v(x) dx$$

on  $v(x)$  és una funció qualsevol que satisfà el fet que  $v(0) = v(\pi) = 0$ . Aquesta equació es converteix mitjançant la regla d'integració per parts en:

$$-\int_0^\pi u(x)v(x) dx = -\int_0^\pi u'(x)v'(x) dx$$

És necessari transformar aquesta forma dèbil en una expressió més adient per treballar-hi, que suposa un canvi de la segona derivada en una expressió de primeres derivades.

Si ara es pren  $v = \gamma_i$  on  $i \neq 0, 8$ , és obvi que es satisfà la condició que  $v(0) = v(\pi) = 0$ . Per tant, si també expressem  $u(x)$  com a sumatori de  $\gamma_j$ , s'obté:

$$\sum_{j=1}^7 u_j \int_0^\pi \gamma_j(x)\gamma_i(x) dx + \sum_{j=1}^7 u_j \int_0^\pi \gamma_j'(x)\gamma_i'(x) dx = 0$$

on els elements

$$\int_0^\pi \gamma_j(x)\gamma_i(x) dx \quad \int_0^\pi \gamma_j'(x)\gamma_i'(x) dx$$

són senzills de calcular i depenen únicament de la malla i els termes  $u_j$  són incògnites. Per tant tenim un sistema de 7 equacions amb 7 incògnites i molts zeros, degut al fet que la majoria d'integrals de  $\gamma_i(x)$   $\gamma_j(x)$  i  $\gamma'_i(x)$   $\gamma'_j(x)$  són zero.

Un cop calculades totes les integrals, el sistema esdevé:

$$\left. \begin{array}{rcl} \alpha u_1 + \beta u_2 & & = 0 \\ \beta u_1 + \alpha u_2 + \beta u_3 & & = 0 \\ \beta u_2 + \alpha u_3 + \beta u_4 & & = 0 \\ \beta u_3 + \alpha u_4 + \beta u_5 & & = 0 \\ \beta u_4 + \alpha u_5 + \beta u_6 & & = 0 \\ \beta u_5 + \alpha u_6 + \beta u_7 & & = 0 \\ \beta u_6 + \alpha u_7 & & = 0 \end{array} \right\}$$

on:  $\alpha = \frac{\pi}{6} + \frac{64}{\pi}$  i  $\beta = \frac{\pi}{48} - \frac{8}{\pi}$ . Finalment, la funció  $u(x)$  aproximada mitjançant aquest mètode es mostra a la Figura 4.6.

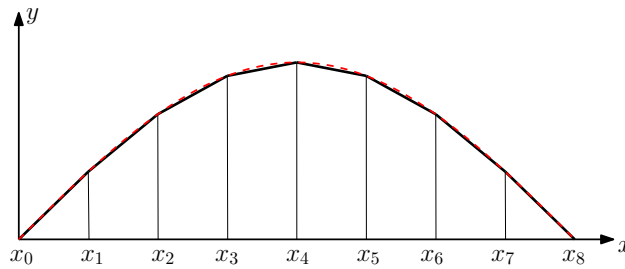


Fig. 4.6: Solució obtinguda mitjançant elements finits (negre) i funció objectiu (vermell)

Com es pot veure a la Figura 4.6, és important alhora de la resolució d'un problema escollir amb quina precisió es vol, ja que depèn del número de punts amb el qual es parteixi el domini. Quants més números de punts fem servir, la funció serà més ajustada i menys errors obtindrem, però computacionalment és més costós.

### 4.2.2 El cas general - 2-Dimensional

Tot seguit, es dóna una breu explicació del cas 2-Dimensional, que és la casuística necessària per resoldre la MSE, descrita a 4.1. Un desenvolupament més extens d'aquest mètode es troba a [6].

L'aproximació dos dimensional segueix el mateix esperit que la desenvolupada a l'apartat anterior. En aquest cas, però, els punts de referència no estan continguts en una recta sinó en un pla i enlloc d'unir els valors amb segments es fa mitjançant triangles. Això obliga a triangular els punts  $v_i$  continguts en el pla.

Per tant, la base de funcions  $\gamma_j$  té l'aparença vista a la Figura 4.7 enlloc de la vista a la Figura 4.4.

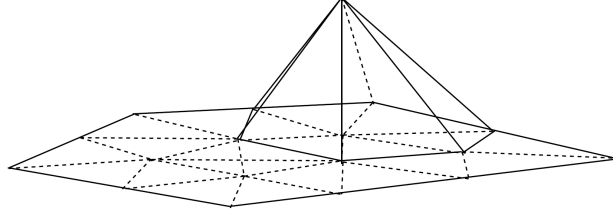


Fig. 4.7: Funcio  $\gamma_i$  en el cas 2-Dimensional. Figura extreta de [6].

En aquest cas la funció objectiu  $u(x, y)$  serà representada com:

$$u(x, y) = \sum_{i=0}^N u(v_i) \gamma_i(x, y) \quad (4.14)$$

Per altra banda, una equació diferencial en derivades parcials té la forma:

$$\left. \begin{aligned} -\nabla^2 u + cu &= f & \Omega \\ u &= g_0 & \Gamma_D \\ \partial_n u &= g_1 & \Gamma_N \end{aligned} \right\}$$

es converteix, mitjançant el Teorema de Stokes, en trobar  $u$  tal que  $u = g_0$  en  $\Gamma_D$  i compleixi

$$\int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v + c \int_{\Omega} uv = \int_{\Omega} f v + \int_{\Gamma_N} g_1 v \quad (4.15)$$

on  $v = 0$  en  $\Gamma_D$ .

Per tant, quan es substitueix (4.14) a (4.15) s'obté l'equació dels elements finits en dues dimensions:

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \Gamma_N} \left( \int_{\Omega} \nabla \gamma_j \nabla \gamma_i + c \int_{\Omega} \gamma_j \gamma_i \right) u(v_j) &= \int_{\Omega} f \gamma_i + \int_{\Gamma_N} g_1 \gamma_i - \\ &\quad \sum_{j \in \Gamma_D} \left( \int_{\Omega} \nabla \gamma_j \nabla \gamma_i + c \int_{\Omega} \gamma_j \gamma_i \right) g_0(v_j) \end{aligned}$$

i  $u(v_j) = g_0(v_j)$  en els punts  $v_j \in \Gamma_D$ . Per simplificar la notació, s'escriu:

$$M_{ij} = \int_{\Omega} \gamma_i \gamma_j \quad W_{ij} = \int_{\Omega} \nabla \gamma_i \cdot \nabla \gamma_j$$

on  $M$  és la matriu de masses i  $W$  és la matriu de rigidesa. Finalment, el mètode es basa en la resolució d'un sistema d'equacions:

$$\sum_{j \in \Gamma_N} (W_{ij} + c M_{ij}) u(v_j) = \int_{\Omega} f \gamma_i + \int_{\Gamma_N} g_1 \gamma_i - \sum_{j \in \Gamma_D} (W_{ij} + c M_{ij}) g_0(v_j)$$

### 4.3 Dades de l'onatge

Una vegada definit el domini i les condicions del problema, cal escollir un ventall representatiu d'angles d'incidència i períodes de l'onatge que incideixen a la costa barcelonina. Per conèixer els episodis d'onatge i obtenir un ventall complet de possibilitats, s'ha consultat la xarxa de boies que mesuren dades periòdicament a la zona de Barcelona.

A la zona de Barcelona hi ha dues xarxes de boies diferents. Una d'elles és la Xarxa d'Instrumentes Oceanogràfics i Meteorològic (XIOM) [50] i l'altra és la de Puertos del Estado [51]. La XIOM té en funcionament la boia del Llobregat que ha permès establir el ventall de casos d'onatges i períodes incidents. La boia de Puertos del Estado, situada a les proximitats del port de Barcelona dona informació del període i de l'angle incident cada hora que, conjuntament amb el mareògraf situat a dins del port barceloní, recull dades en temps real minut a minut. Això ha permès contrastar els resultats obtinguts amb les simulacions i ha ajudat a calibrar els paràmetres necessaris.

A continuació, a la Figura 4.8 es pot veure la localització dels instruments de les dues xarxes.

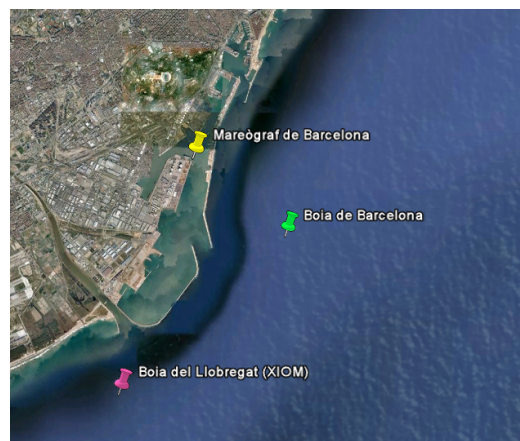


Fig. 4.8: Situació de les boies i el mareògraf

A la següent taula (Taula 4.1), es detallen les posicions de cada una de les boies i del mareògraf dels quals s'han extret dades per treballar en les simulacions del sistema de predicció.

### 4.4 Port de Barcelona

L'elecció del port de Barcelona com a escenari per a l'estudi de l'agitació d'aquesta tesina ha vingut motivat per diferents factors. Barcelona ha estat tradicio-

Taula 4.1: Localització de les boies al port

Boia	Latitud	Longitud
Mareograf de Barcelona	41° 20' 30" N	2° 09' 49" E
Boia del Llobregat	41° 16' 41" N	2° 08' 29" E
Boia de Barcelona	41° 19' 12" N	2° 12' 00" E

nalment una ciutat encarada al mar i el seu port és una eina clau per l'economia d'aquesta metropoli. Des de desembre de 2010, amb l'entrada en funcionament del servei de trens d'ample internacional, el port de Barcelona ha quedat connectat amb França tot disminuint en 6 hores els temps de trajecte i una disminució important dels costos. El fet d'haver trencat la barrera de l'ample de via ha fet que s'hagin obert encara més noves oportunitats de desenvolupament econòmic i que el port quedi connectat al corredor Mediterrani. Aquesta fita ha significat unes millores importants en el port que ha permès i permetrà, conjuntament amb l'ampliació de terminals, que hi hagi un creixement en trànsit de mercaderies molt important. Queda palès que aquesta ciutat necessita dels millors coneixements per donar resposta a tota l'activitat que genera tant ara com en un futur, de la manera més eficient possible.

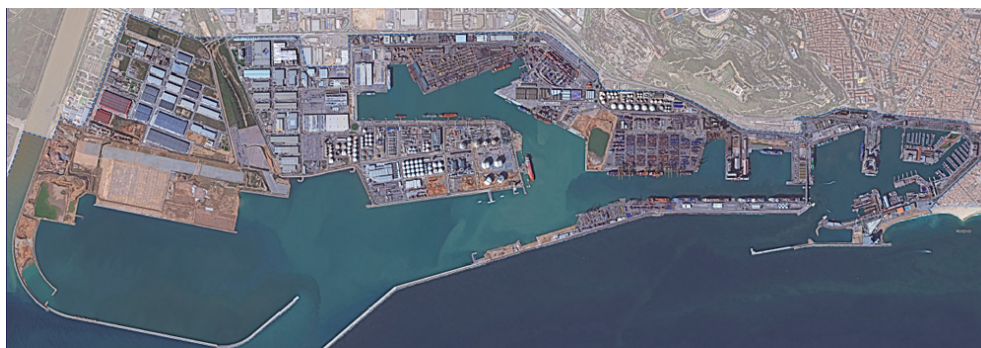


Fig. 4.9: Planta general del port de Barcelona

D'altra banda, l'elecció també ha vingut motivada per la facilitat a l'accés de dades d'aquest port i pels estudis ja fets amb altres models, que ha permès que les simulacions obtingudes que es presentaran posteriorment hagin pogut ser contrastades de diferents maneres, tal com s'exposa a 5.3.

Actualment la superfície terrestre del port és de 828,9 Ha i en uns anys es preveu ampliar-la amb les obres que s'estan duent a terme. Barcelona passarà a ser el port amb major la superfície logística del Sud d'Europa.

La tesina s'ha elaborat amb dues batimetries diferents. La batimetria de l'interior del port amb una resolució de 165092 punts i la del mar Mediterrani a Catalu-



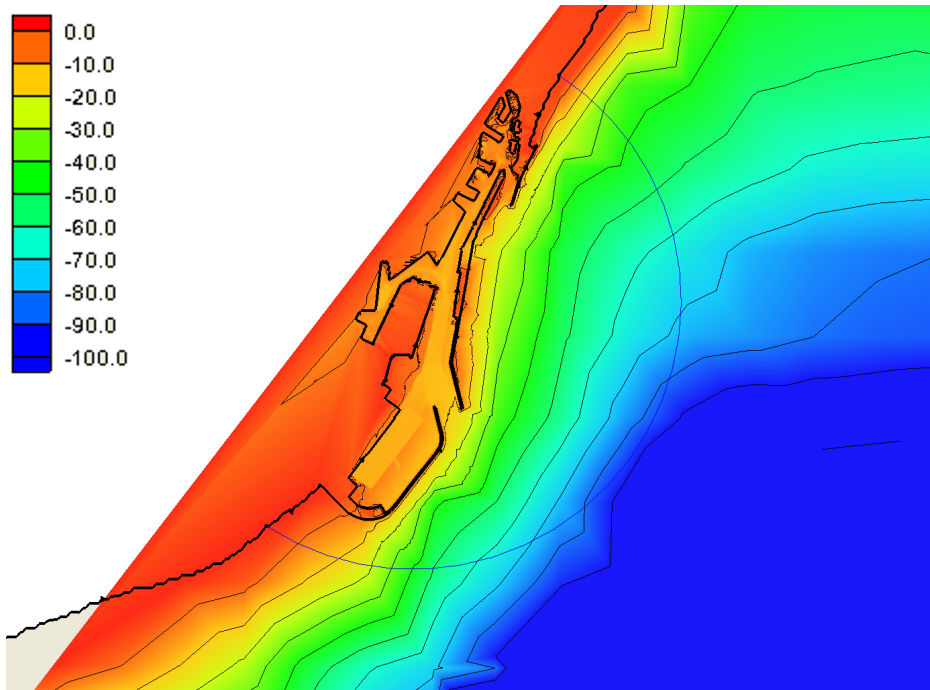


Fig. 4.10: Batimetria del port de Barcelona en metres

nya amb una resolució de 188 punts. Ambdues han estat superposades – obtenint la batimetria mostrada a la Figura 4.10 per poder generar la malla per a la resolució del problema.

La línia de la costa ens ha estat proporcionada a principis de Octubre de 2010 i ha estat modificada el Març de 2011, ja que el port està en fase d'ampliació i està en constant canvi. Tanmateix la batimetria de l'interior del port és de Març de 2011 i l'estudi s'ha fet amb aquest material.

Per definir correctament els paràmetres de reflexió del port, s'ha utilitzat Google Earth [52], que ha permès la visualització amb precisió dels diferents materials i els tipus de dic amb els quals s'ha construït el port.

## 4.5 Software d'Aquaveo

A continuació, es presenta el programari utilitzat per dur a terme l'estudi de l'agitació en el port de Barcelona.

### 4.5.1 CGWAVE

Tal i com s'ha presentat, l'objectiu d'aquesta tesina és resoldre el problema d'agitació portuària mitjançant l'equació *Mild-Slope* (MSE) (4.1) i el mètode dels elements finits. Des de l'any 1998, existeix un programari especialitzat anomenat CGWAVE [46] que és capaç de realitzar aquesta tasca. Aquesta implementació permet resoldre l'equació MSE tenint en compte els fenòmens de refracció, de difracció i de dissipació energètica per fricció, trencament de les ones i dispersió no lineal.

La implementació utilitza una aproximació semi-parabòlica [47] per modelar el problema 4.1.3. Finalment, per trobar la solució utilitza el mètode dels elements finits amb un algorisme iteratiu d'optimització (mètode dels gradients conjugats [53]) per resoldre el sistema.

La implementació existent del programa, distribuïda per Aquaveo i el Cos d'Enginyers de l'Exèrcit dels Estats Units, espera que l'usuari introdueixi una triangulació, una batimetria i una frontera del domini. Com a paràmetres per a la simulació, és necessari donar un període, l'angle d'incidència de l'onatge, l'amplitud d'aquest, els coeficients de refracció del port i platges i els diferents coeficients de dissipació energètica: la fricció del fons i la probabilitat de trencament de les ones. Amb tota aquesta informació, el CGWAVE és capaç de generar l'alçada de les ones, la fase, la direcció, la velocitat i les pressions a tota la regió del domini. Cal afegir que el CGWAVE imposa un requisit molt dur sobre la triangulació del domini: el nombre d'elements ha de ser proporcional a la longitud d'ona en zones costaneres (degut al shoaling 3.1.1). Això vol dir que la malla dependrà del període de l'onatge i de la batimetria.

Exemples d'ús de CGWAVE per a la predicció de l'onatge en ports es pot trobar a [37], on CGWAVE és utilitzat per estudiar l'onatge dins del port de Long Beach a Los Angeles, i a [38], on CGWAVE és utilitzat per estudiar l'onatge dins el port de Ponce de Leon a Florida.

El programa original va ser desenvolupat en Fortran, encara que ara només es pugui trobar en versió compilada on tots els paràmetres han de ser passats mitjançant un fitxer de text. Per tant, és necessari l'ús d'un altre programa per a pre-processar les dades – generar la malla, calcular la batimetria i generar les dades dels transects – i per mostrar els resultats un cop el CGWAVE ha acabat d'executar. Aquest programari s'anomena *Surface water Modeling Systems* i és explicat en més detall a la secció 4.5.2.

### 4.5.2 *Surface water Modeling Systems*

El programa *Surface water Modeling Systems* (SMS) és una potent interfície gràfica que permet fer un ampli ventall d'operacions amb les dades inserides. En

aquest secció ens renstringirem a explicar la seva habilitat per a interconnectar-se amb CGWAVE, però es pot trobar més informació a [54].

Pel cas que en aquest treball s'utilitza, SMS serveix principalment per a generar una malla que el CGWAVE pugui utilitzar per a resoldre el problema de la propagació de l'onatge cap al port. Tal i com ja hem introduït a 4.5.1, el nombre d'elements d'aquesta malla ha de ser proporcional a la longitud d'ona, per tant, el procediment per a generar-la és:

1. Calcular la longitud d'ona a tot el domini per un període determinat ( $T$ ) i una gravetat ( $g$ ).
2. Crear una malla amb un nombre d'elements proporcional a aquesta longitud d'ona.
3. Suavitzar la malla per tal que l'àrea d'elements adjacents sigui similar.

Generalment, el pas de suavitzar la malla és necessari en el mètode d'elements finits per disminuir els errors d'aproximació.

Un cop la malla ha estat generada, el programari SMS ja ha acabat la seva tasca principal i esdevé una interfície gràfica per al CGWAVE que permet fer el postprocés i la visualització de les dades.

### 4.6 Previmer

Previmer és un sistema pre-operacional desenvolupat per una associació d'organismes francesos que té com a objectiu la predicció a curt termini a les costes franceses. Té previst abarcar diferents públics, des de informació pel públic general, com ser utilitzat per a aplicacions científiques i tècniques, com poden ser la teledetecció o el cas que ocupa el present treball: l'enginyeria de costes. Un conjunt de punts d'observacions i de modelitzacions numèriques permeten que aquest sistema ofereixi prediccions a quatre dies vista sobre l'estat de la mar, les corrents, els nivells de la marea i la temperatura.

Des de la seva posada en marxa el 2006, Previmer encara es troba en una fase d'informació per als usuaris que ho desitgin. El sistema es troba en experimentació per tal de millorar la calibració dels paràmetres i dels temps computacionals que necessita. Totes les informacions a les que s'accedeix tenen fins informatius i no són encara legals per predir. Tant és d'aquesta manera que el sistema està obert i es pot accedir a les seves bases de dades per modelitzar nous llocs i ampliar l'estudi.

Aquest sistema prediu per tots els mars que banyen les costes franceses: un d'ells, el mar Mediterrani. Per la proximitat que té Catalunya, Previmer també

obté dades de predicció del mar català que són transmeses a SIMO [55] i treballades posteriorment, d'on s'obté una predicció diària amb dades a cada hora pel desenvolupament del sistema operacional d'aquesta tesina.

Actualment les dades del Mediterrani són obtingudes amb una malla regular i s'utilitza el codi WWATCH III [56], la resolució és de 3,6km i a la pàgina de Previmer es poden trobar prediccions cada 3 hores. Per saber més detalladament les millores que s'estan duent a terme i els paràmetres que es fan servir es pot veure [57].

Previmer és doncs un sistema que permetrà obtenir dades automàticament cada dia de la predicció d'onatge prevista a la zona del port de Barcelona, i és aquesta eina amb la qual es treballa per presentar el sistema de predicció d'agitació que es mostra al capítol 6.

## 4.7 Pàgina web

En aquesta secció, primerament, s'explica al lector perquè s'ha cregut necessària l'eina d'una pàgina web i, posteriorment, s'explica quines dades han estat requerides i de quina manera ha estat pensada i creada la pàgina.

La pàgina web ha estat pensada com un material per mostrar els resultats finals. És una manera per tal que les dades siguin visibles per tots els usuaris autoritzats (té contrassenya) i es tracta d'una eina que permet consultar les dades de manera molt senzilla. Accedint a la direcció de la pàgina l'usuari ja pot veure els resultats en temps real i fent click a un desplegable pot consultar les hores de predicció que es disposin. Aquesta interfície és, doncs, una manera atractiva d'aplicar els resultats teòrics obtinguts a la realitat i donar una justificació pràctica.

La finalitat de la pàgina tal com s'ha explicat anteriorment és poder mostrar els resultats amb dades reals i actualitzades. Amb aquesta idea, ha estat necessari tenir accés a dades de predicció d'onatge amb temps real. Aquestes dades són obtingudes diàriament des de PREVIMER i processades per SIMO, tal i com s'explica a la secció anterior 4.6. Per obtenir les dades periòdicament, ha fet falta una tecnologia que fos capaç d'obtenir aquestes dades automàticament i que a la vegada fos també capaç de buscar la simulació que fós més adient amb les dades per acabar-ho mostrant a l'usuari final.

Per aconseguir l'anteriorment descrit, s'ha usat la tecnologia PHP [58] degut a la seva simplicitat i potència. Ha permès crear una web dinàmica i senzilla, tant per la programadora com per l'usuari. Tot seguit, es mostra un esquema pas a pas de les accions de la pàgina:

1. Autorització de l'usuari. Contrassenya.
2. Descàrrega del fitxer .dat del servidor de SIMO.

3. Mitjançant l'hora del servidor i el fitxer .dat s'identifica quina es la predicció més acurada pel moment actual.
4. Mostra aquesta predicció a l'usuari.

A més a més, a l'usuari se li permetrà escollir entre diferents franges horàries de predicció en les quals desitgi veure l'estat de l'agitació. El codi font es pot trobar a l'apèndix B.



# Capítol 5

## Resultats

En aquest capítol es presenten els resultats obtinguts amb CGWAVE. Primer de tot, s'explica quins han estat els *inputs* emprats per a l'obtenció dels resultats. Posteriorment, es mostra la calibració feta amb dades reals consultades a la pàgina web de Puertos de l'Estado i per últim la validació que s'ha dut a terme comparant CGWAVE (model Mild-Slope) amb un model Boussinesq.

### 5.1 Implementació

En aquesta secció es detallaran les característiques i els paràmetres utilitzats per simular amb CGWAVE.

El domini de càlcul ha estat definit segons les recomanacions del manual del CGWAVE [46]. Per uns resultats correctes es recomana que el seu radi sigui entre dues i tres vegades la longitud màxima d'ona. S'han consultat les dades de la boia del XIOM i s'ha revisat l'estadística acumulada des del 1984 al 2009 per veure la longitud màxima d'ona. El període mitjà màxim és de 11,5 segons i la seva longitud d'ona associada és molt petita comparada amb la longitud del nostre port.

En aigües poc profundes la longitud d'ona es defineix com

$$L = \sqrt{ghT}$$

on  $g$  és la gravetat a Barcelona ( $9.802871 \text{ m/s}^2$ ),  $h$  la profunditat i  $T$  el període. En el nostre cas, la màxima longitud d'ona obtinguda es troba entre els 100 i 200 metres. Per tant, la recomanació és insuficient per la longitud del port que és d'aproximadament 9.5 km. Per definir un domini adequat és necessari que contingui tot el port i un tram de la costa propera. La regió final té una forma semi-circular amb un radi de 5959 metres. L'àrea tancada té una superfície de 5197 Ha i es pot veure a la Figura 5.1.

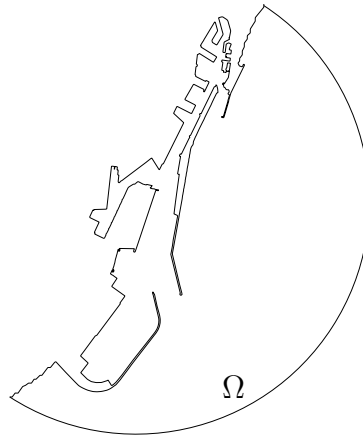


Fig. 5.1: Domini del port de Barcelona, el semi-cercle té un radi de 5959 metres i en total hi han 5197 Ha d'aigua

Una de les característiques del domini és que a la seva esquerra es troba la desembocadura del riu Llobregat. El seu tractament amb el CGWAVE ha estat definir el tram com a platja amb un coeficient de reflexió igual als altres trams de platja. Aquesta assumpció s'ha fet ja que la desembocadura d'aquest riu es troba en equilibri i no hi ha ni aportacions ni pèrdues de sediment.

Tal i com s'explica a la Secció 4.5.2, s'ha utilitzat el programari SMS per a generar la malla. També s'ha explicat a la Secció 4.5.1 que el nombre i la mida dels elements de la malla ha de ser proporcional a la longitud d'ona en cada punt de la batimetria. S'ha triat posar cinc (5) elements per longitud d'ona, aquest paràmetre ha estat escollit de forma empírica i basat en [37, 38, 39, 46]. En total, s'ha generat una malla de 794564 elements i 400680 nodes. El nombre d'elements és adequat, degut a que la versió per defecte de CGWAVE només pot processar malles amb 800000 elements. A la Figura 5.2, es pot veure un parell d'exemples de la triangulació en el port de Barcelona i un zoom per veure la malla més clarament es troba a la Figura 5.3.

Per generar la longitud d'ona en la qual està basada la malla, s'ha triat un període  $T = 8$  segons. En el cas de Barcelona, no es pot generar la malla per períodes inferiors a 8 segons degut a la limitació dels 800000 elements. Per tant, els estudis amb resultats amb bona precisió seran a partir de 8 segons. Per resultats amb períodes inferiors a 8 segons es poden trobar amb una manca de resolució a la malla i per tant, una falta de precisió en els resultats. D'altra banda, els episodis d'agitació estan relacionats amb tempestes energètiques i aquestes tenen períodes elevats, o sigui que per períodes petits l'operativitat no queda afectada i no és tan important coneixe'n l'estat.

Per determinar les característiques de l'onatge que incideix en el port de Bar-



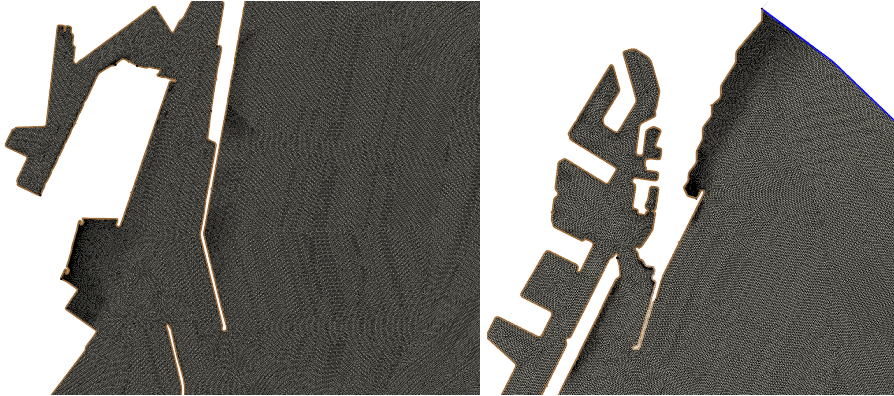


Fig. 5.2: Zoom en dues regions de la malla

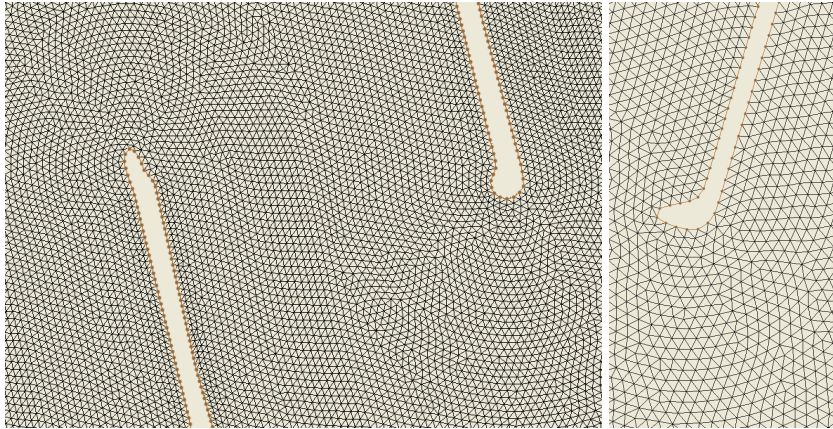


Fig. 5.3: Zoom en dues regions de la malla

celona s'ha consultat l'estadística acumulada de la boia del Llobregat de la XIOM. D'aquesta boia s'ha obtingut la direcció d'on prové l'onatge incident i també dels seus períodes.

Les dades històriques d'aquesta boia, inciten a simular des de un període de 7 segons fins a un de 15 segons. El ventall d'angles incident va des dels  $50^\circ$  fins als  $180^\circ$  mesurats des del nord, com es pot veure en la Figura 5.4.

El ventall d'angles incidents escollit s'han simulat amb CGWAVE però tenint en compte que aquest programari no demana l'angle incident des del nord sinó que demana la direcció de propagació des de l'est.

Per exemple, en el cas que l'onatge incideix a  $50^\circ$ , vol dir que l'onatge es propaga en la direcció  $130^\circ$ . Tot i això, CGWAVE no mesura l'onatge des del Nord, sinó des de l'Est, i per tant, enlloc de  $50^\circ$  graus Nord, l'onatge es propaga en la direcció de  $220^\circ$  des de l'Est, degut a què  $220 = 180 + 40$  com es pot veure a la Figura 5.5. Per tant, la casuística d'angles simulats amb CGWAVE, o sigui



Fig. 5.4: Ventall d'angles incidents que s'han considerats

tenint en compte direcció i des de l'Est, van des de 90° graus fins a 220°.

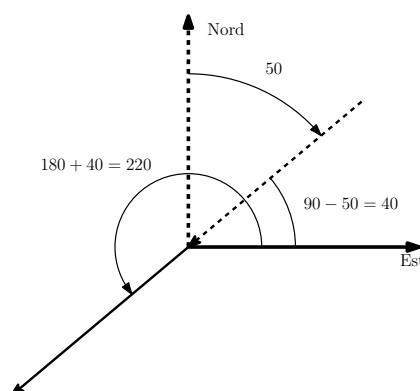


Fig. 5.5: Exemple de canvi de sistema de referència

Tal com s'ha introduït a la Secció 4.1.3, per a resoldre la condició de contorn a mar obert s'utilitza la profunditat del fons marí en dos transects. Els transects es poden veure a la Figura 5.6, la seva profunditat es troba a la Figura 5.7. Aquests transects són dos talls perpendiculars a la costa que permeten resoldre la condició de mar obert en 1-Dimensió i, una vegada resolt, mitjançant translacions i interpolacions es resol per a tot el domini obert. Per poder tenir aquesta condició de contorn ben definida es necessita tenir informació batimètrica més enllà del domini, aproximadament dues vegades el radi utilitzat per definir el domini. Aquest mètode ha permès simplificar la condició de contorn en mar obert i fa que el cost computacional del problema resulti baix.

Altrament, a la Secció 4.1.3 s'ha explicat que per a resoldre la condició de contorn a la costa cal definir els coeficients de reflexió. En el cas de Barcelona s'ha diferenciat el coeficient segons el tipus d'estructura o si es tractava de platja, ja que

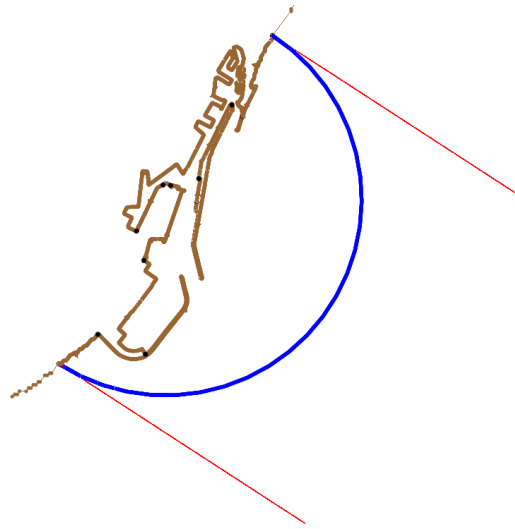


Fig. 5.6: Transects en el port de Barcelona. Vista en planta

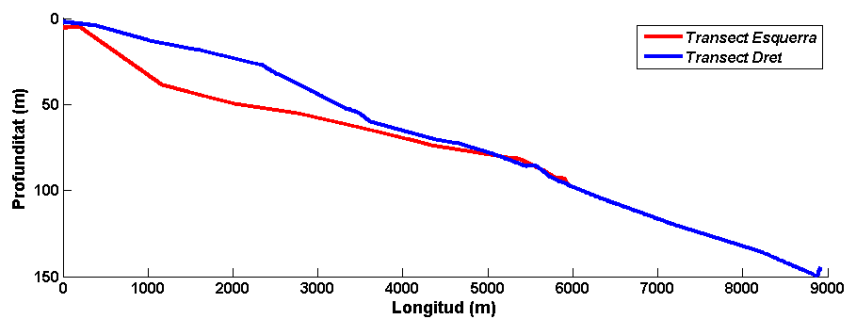


Fig. 5.7: Transects en el port de Barcelona. Vista de perfil

la reflexió tindrà un coeficient força diferent. Google Earth ha permès visualitzar la planta del port i copsar quins són els materials que revestien l'emplaçament. Al port de Barcelona s'hi han trobat dics verticals i d'escollera (aquests de diferent tamany segons el tram) i a l'entorn fora del port, platja. La limitació d'aquests trams es pot veure a la Figura 5.8. Els coeficients emprats es detallen a la Taula 5.1 que s'han determinat empíricament seguint els valors recomenats de la Figura 3.5.

CGWAVE permet a l'usuari escollir cada un dels seus paràmetres per separat. Com s'ha comentat anteriorment, es pot escollir els coeficients de reflexió a trams. A més a més, permet escollir l'opció de trencament d'ones, si aquestes trenquen o no i en quina proporció. També es pot escollir la fricció de fons, quins materials té el fons i amb quin coeficient afecten, i per últim permet tenir en compte els efectes

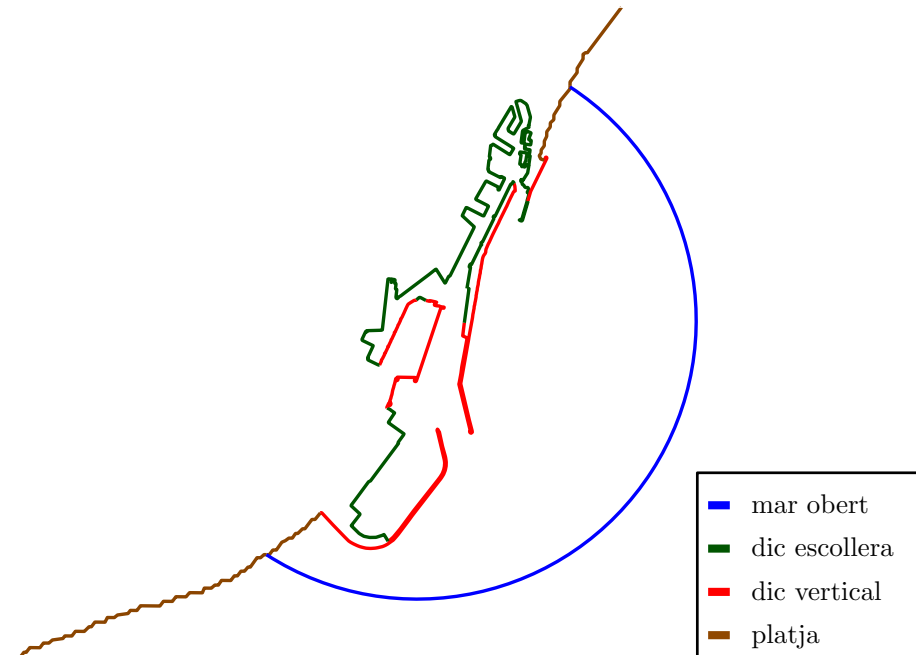


Fig. 5.8: Coeficients emprats en les diferents zones del port

Taula 5.1: Valors de reflexió emprats en el port

Tipus de superfície	Coeficient de reflexió
Dic escollera	0.60
Dic vertical	0.90
Platja	0.05

de la dispersió no lineal. En el cas del port de Barcelona, s'ha optat per la hipòtesi de menysprear els termes no lineals, ja que augmentaven els costos computacionals més del doble. Les característiques de l'onatge a Barcelona també feien veure que no afectaven en excés i els resultats obtinguts no donaven uns grans canvis al resultat lineal. Les alçades d'ona eren una mica menors degut a la dissipació però al decidir menysprear-ho ens hem quedat al costat de la seguretat en obtenir onatges una mica més alts.

La realització d'aquest estudi s'ha dut a terme en un Intel Core2 Duo T9600 a 2.8 Ghz i amb 4 GB de memòria RAM. A la següent Taula (5.2) es presenten els costos computacionals de les simulacions generades.

Com es pot veure a la Taula 5.2, el temps per resoldre el problema augmenta en relació al període. Com ja s'ha exposat prèviament, per a totes les simulacions s'havia fixat la malla generada assumint un període de 8 s. Per veure l'efecte d'això

Taula 5.2: Costos computacionals de CGWAVE

Període (segons)	Temps de càlcul (minuts)
7	8
8	12
9	13
10	16
11	20
12	24,5
13	30
14	37
15	41

en el temps de simulació, s'ha decidit fer una segona malla assumint un període de 15 segons. Aquesta nova malla té només 21171 nodes i 40862, aproximadament un 6% del nombre d'elements de la malla prèvia. El temps per a resoldre el problema amb període de 15 segons disminueix de 41 minuts a 1 minut escàs. Veient aquesta rebaixa del cost computacional fa veure clarament que seria una bona política per futurs estudis generar més d'una malla. Per exemple si els casos a estudiar van de períodes des de 7 a 20 segons, doncs prendre la determinació de fer tres malles. Una associada a un període de 7 segons, una altra a 12 segons i una altra a 16 segons.

## 5.2 Calibració

A la Secció 5.1 s'han mostrat els coeficients de reflexió emprats en la simulació, i s'han comentat les hipòtesis preses. En aquest apartat es pretén mostrar com el model s'ajusta a la realitat, una vegada s'ha tingut clar el funcionament del programari i d'haver arribat a uns resultats previs prou satisfactoris.

El problema principal en aquest procés és el fet que només s'ha disposat de mesures de l'onatge en un punt del port; on està situat el Mareògraf (veure Figura 4.8). Aquest punt es troba situat en una zona força tranquil·la del port i no registra alçades d'ona massa elevades sinó és en èpoques de fortes maregasses. Durant el desenvolupament del treball, s'ha accedit al registre de dades disponibles en èpoques en que el mar ha estat en calma. Per aquest motiu les dades que es tenen són registres de períodes que oscil·len entre els 6 i 8 segons. En aquests períodes tal com s'ha comentat anteriorment, els resultats són menys fiables per la falta de precisió a la malla.

En canvi a partir dels vuit segons, la precisió de la malla és bona i els resultats

semblen ser més ajustats a la realitat.

Per arribar a aquestes conclusions, una vegada el model ja ha estat determinat, s'ha comparat els valors obtinguts de les simulacions amb els valors registrats al port. Tot seguit es pot veure a la Taula 5.3 un seguit de casuístiques dutes a terme per provar el model. En aquesta taula es mostren els *inputs* introduïts al model i el resultat esperat i obtingut.

Taula 5.3: Comparació entre les mesures del mareògraf i les solucions obtingudes amb el CGWAVE.

Angle incident des del Nord	Període	Alçada exterior	Alçada registrada pel mareògraf	Alçada obtinguda amb la simulació
171°	6.4 s	0.35 m	0.05 m	0.105 m
129°	6.4 s	0.37 m	0.05 m	0.039 m
132°	6.8 s	0.25 m	0.04 m	0.018 m
149°	6.9 s	0.25 m	0.10 m	0.050 m
152°	6.9 s	0.30 m	0.06 m	0.035 m
170°	6.9 s	0.25 m	0.06 m	0.059 m
163°	6.9 s	0.33 m	0.11 m	0.034 m
149°	7.1 s	0.33 m	0.07 m	0.060 m
153°	7.2 s	0.34 m	0.09 m	0.091 m
135°	7.3 s	0.25 m	0.06 m	0.034 m
145°	7.4 s	0.28 m	0.04 m	0.036 m
174°	7.5 s	0.27 m	0.15 m	0.090 m
130°	7.7 s	0.26 m	0.03 m	0.026 m
39°	7.9 s	0.34 m	0.04 m	0.002 m
156°	7.9 s	0.27 m	0.04 m	0.040 m
114°	7.9 s	0.30 m	0.04 m	0.016 m
139°	7.9 s	0.26 m	0.05 m	0.036 m
162°	8.4 s	0.41 m	0.08 m	0.077 m

Com es pot veure els resultats obtinguts a la Taula 5.3 tenen un ordre de magnitud adequat i són semblants a la realitat encara que lleugerament inferiors, l'error quadràtic mitjà és de 0.0011 i es redueix a 0.0004 tenint en compte només els casos de 7.9 segons i 8.4. Aquest fet pot ser degut a que aquestes simulacions s'han efectuat amb unes característiques diferents de les que hi havia a en aquell moment al port, conseqüència de les obres d'ampliació o altres motius que es desconeixen. L'estudi queda limitat a la valoració en el mareògraf. A continuació, a les Figures 5.9 i 5.10 es mostren dos dels casos estudiats i es detalla la posició del punt d'estudi.



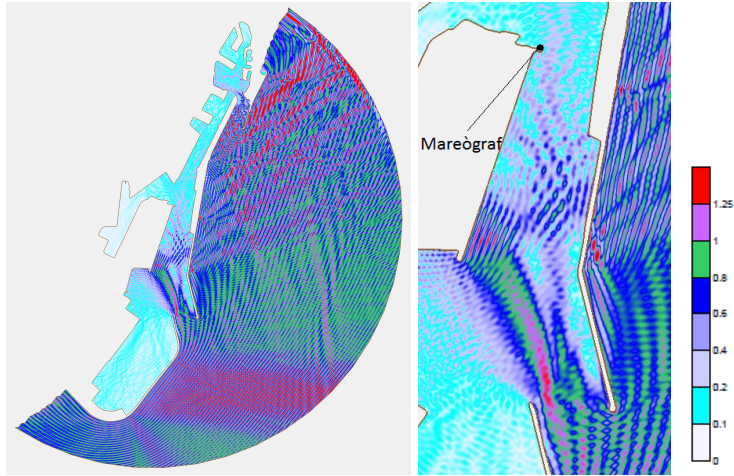


Fig. 5.9: Cas  $T=8.4$  segons  $\theta=162^\circ$   $H_{interior}=0.08$  m. A l'esquerra vista general. A la dreta detall de la bocana i del punt d'estudi.

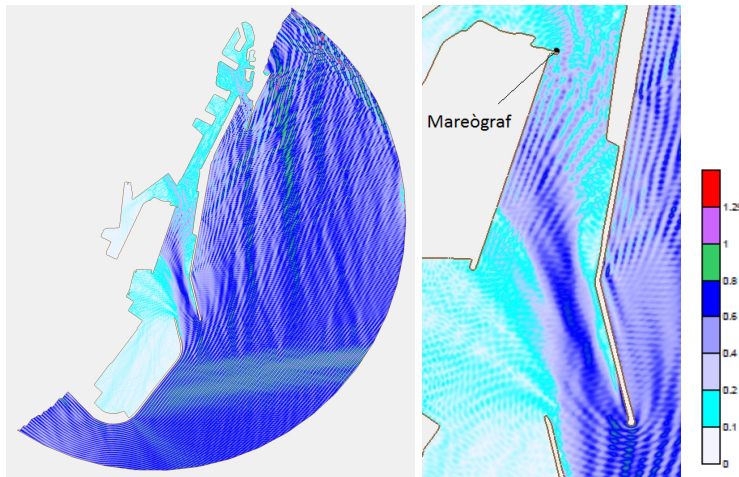


Fig. 5.10: Cas  $T=7.5$  segons  $\theta=174^\circ$   $H_{interior}=0.15$  m. A l'esquerra vista general. A la dreta detall de la bocana i del punt d'estudi.

### 5.3 Validació

Tal i com s'ha comentat a la secció anterior, un problema fonamental que ens hem trobat en aquest treball és la impossibilitat de saber l'alçada de les ones en diferents punts a l'interior del port de Barcelona a temps real. En altres paraules, només tenim informació de l'alçada d'ona en un únic punt del port (on està situat el mareògraf). Degut a aquest fet, cal buscar una altra forma de validar els resultat. Per solucionar aquest problema de manca de dades, s'ha optat per comparar les simulacions de CGWAVE amb els resultats d'un model Boussinesq, el model numèric LIMPORT [59]. Com que els models són diferents, cal esperar una mínima diferència entre les aproximacions. Tot i això, s'han de trobar característiques similars en les dues simulacions.

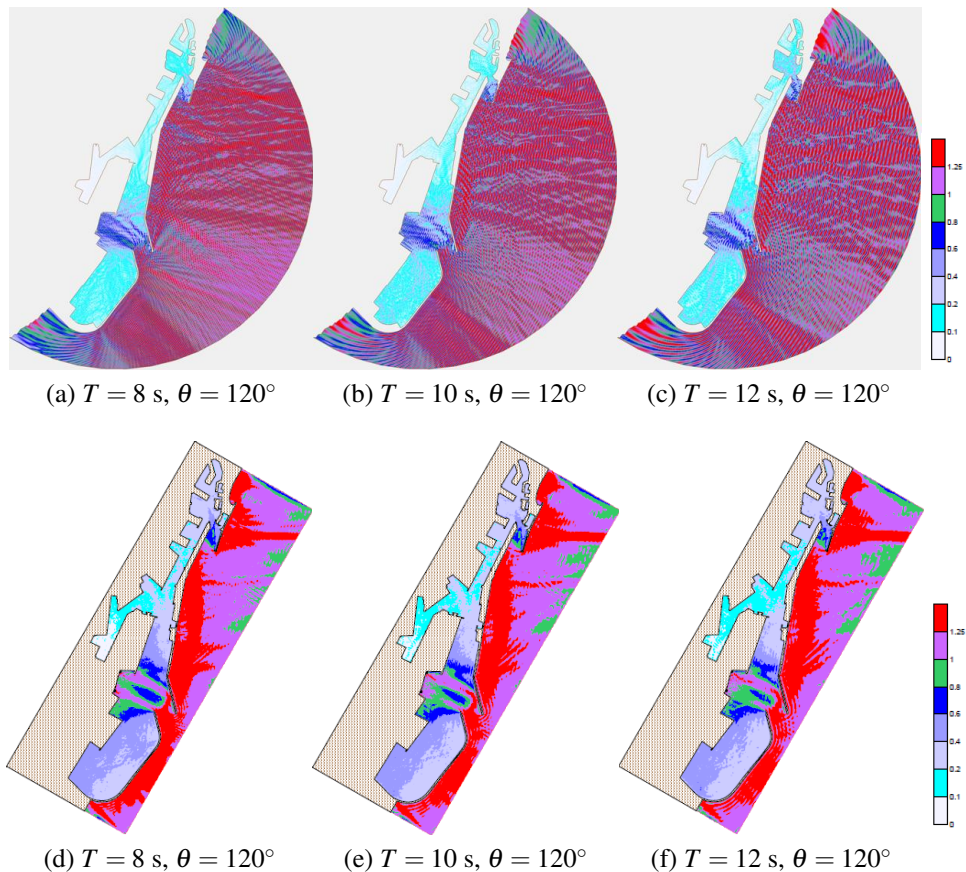


Figura 5.11: Comparativa entre els models CGWAVE i LIMPORT,  $\theta=120^\circ$ .

Per poder-los comparar, de manera senzilla, s'ha utilitzat la mateixa escala de colors. Totes les imatges que es presenten a continuació per comparar el model



CGWAVE, han estat extretes de l'Atlas de agitación portuaria y riesgos ambientales desenvolupat pel Laboratori Marítim de la Universitat Politècnica de Catalunya, que treballa l'agitació amb el model numèric LIMPORT.

Com podem veure a la Figura 5.11, amb un angle de  $120^\circ$  i mateixos períodes de 8, 10 i 12 segons, ambdós models semblen donar el mateix resultat a la part exterior del port: l'onatge incident penetra a la bocana de manera molt semblant. Però a l'interior del port, el model CGWAVE dissipa més energia generant menys agitació. En un altre cas, amb un angle incident de  $50^\circ$  el model implementat per CGWAVE dissipa més energia que LIMPORT, tot i donar formes molt similars. A la Figura 5.12, es mostra com fins l'entrada de la bocana es mantenen els coeficients similars, i l'onatge que penetra dins del port pateix una dissipació important d'energia. Això pot ser degut a batimetries i a coeficients, per exemple de reflexió, diferents, ja que es disposen dels resultats i no de com s'han arribat a ells.

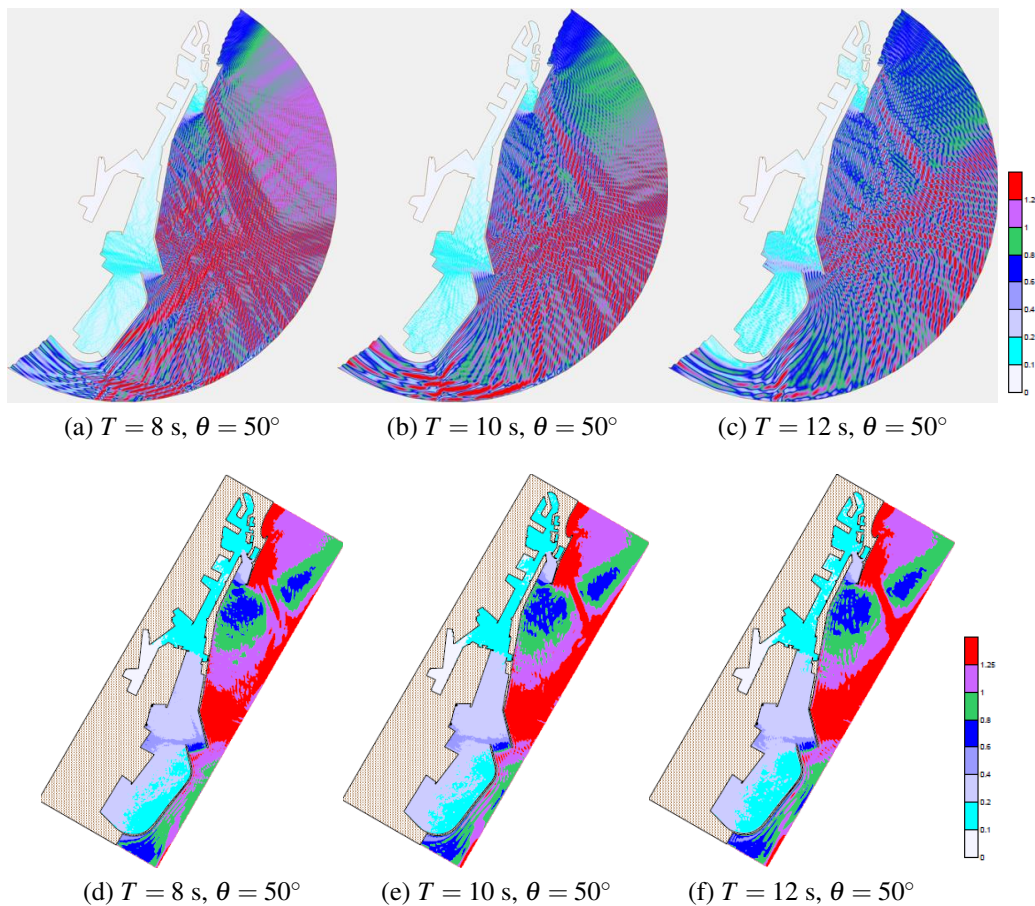


Figura 5.12: Comparativa entre els models CGWAVE i LIMPORT,  $\theta=50^\circ$ .

També és interessant veure a la Figura 5.13 com, per un mateix angle, varia l'agitació amb relació al període, ja que al incrementar-se el període l'onatge incideix amb major energia i com a resultat les aigües del port es mostren més agitades i amb alçades majors.

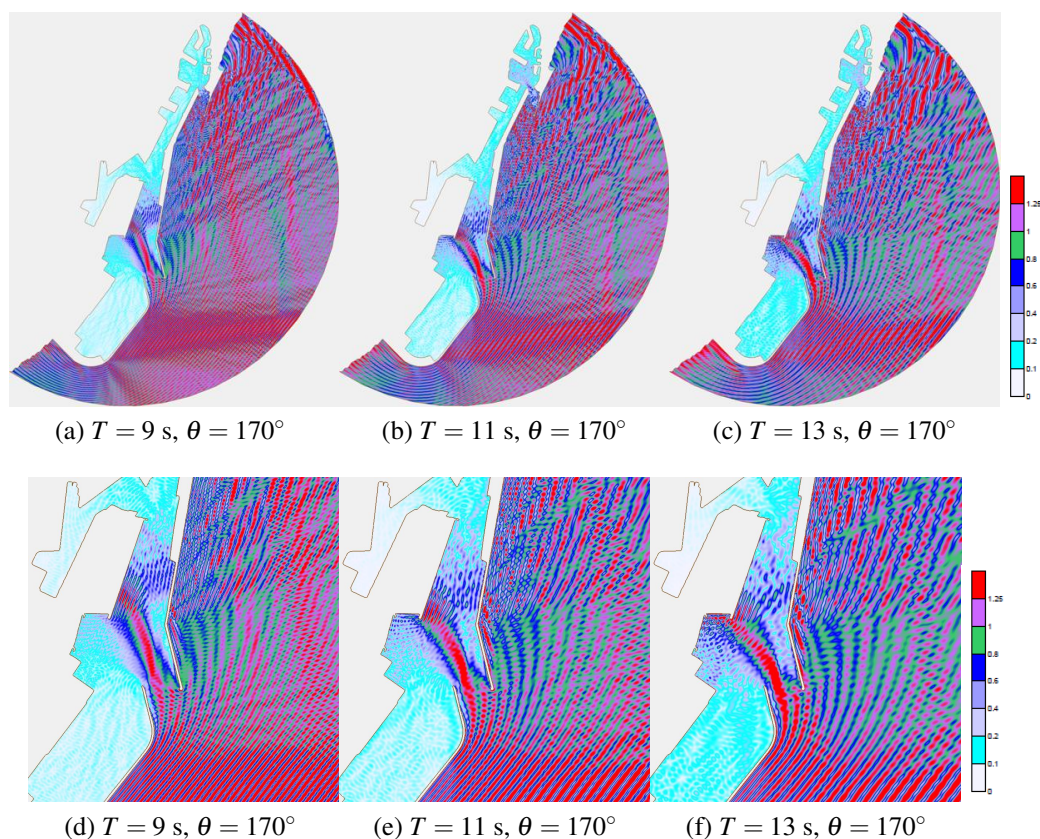


Figura 5.13: Vista dels coeficients d'agitació del port en diferents situacions de períodes i detall de l'entrada de la bocana.

Una de les justificacions d'utilitzar el model de Mild-Slope implementat per CGWAVE es mostra a la Figura 5.14. En aquesta figura es veu com ambdós models tracten el fenomen de la difracció (explicat a la Secció 3.1.4). Un primer anàlisi dels resultats sembla que CGWAVE dóna més realisme al fenomen que no pas les del LIMPORT. Aquesta observació s'ha fet per un angle de  $180^\circ$  on l'onatge difractat pel CGWAVE sembla que tingui un comportament més proper al teòric. Tot i aixó, un anàlisi més acurat no és possible ja que de les solucions de LIMPORT només en tenim la imatge.



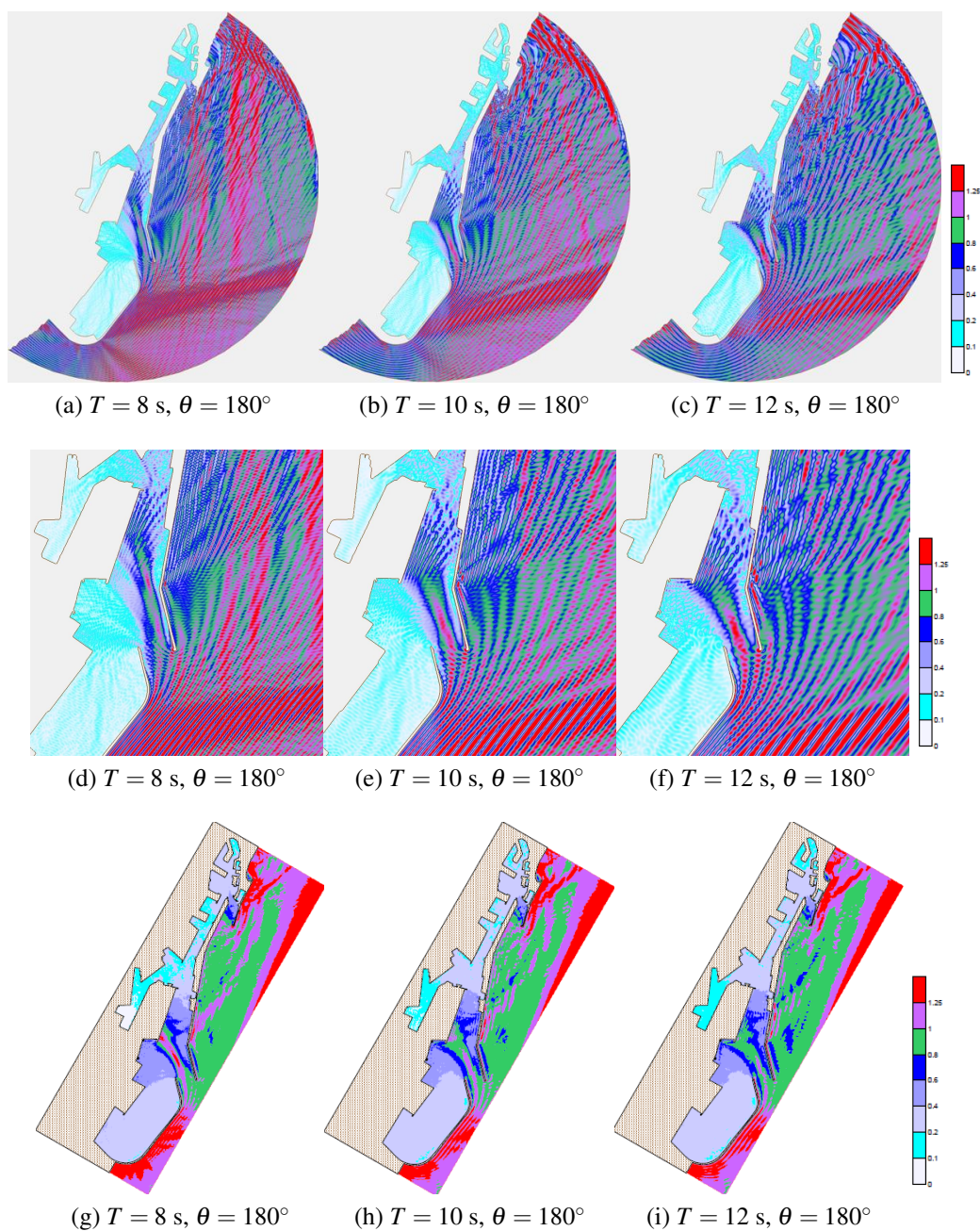


Figura 5.14: Comparativa entre els models CGWAVE i LIMPORT,  $\theta=180^\circ$ .

Finalment, podem veure com un onatge molt energètic (associat a períodes alts) afecta al port i en concret a la bocana. A la Figura 5.15 es mostra l'onatge incident per un període de  $T = 20$  segons. Com es pot apreciar les alçades d'ona

són importants i s'ha de vigilar quan aquest tipus d'onatge incideixi en una direcció directe cap la bocana (angles  $160^\circ$ ,  $170^\circ$  i  $180^\circ$  en el cas de Barcelona), o sigui quan l'onatge va cap una direcció que no hi ha gairebé elements de protecció.

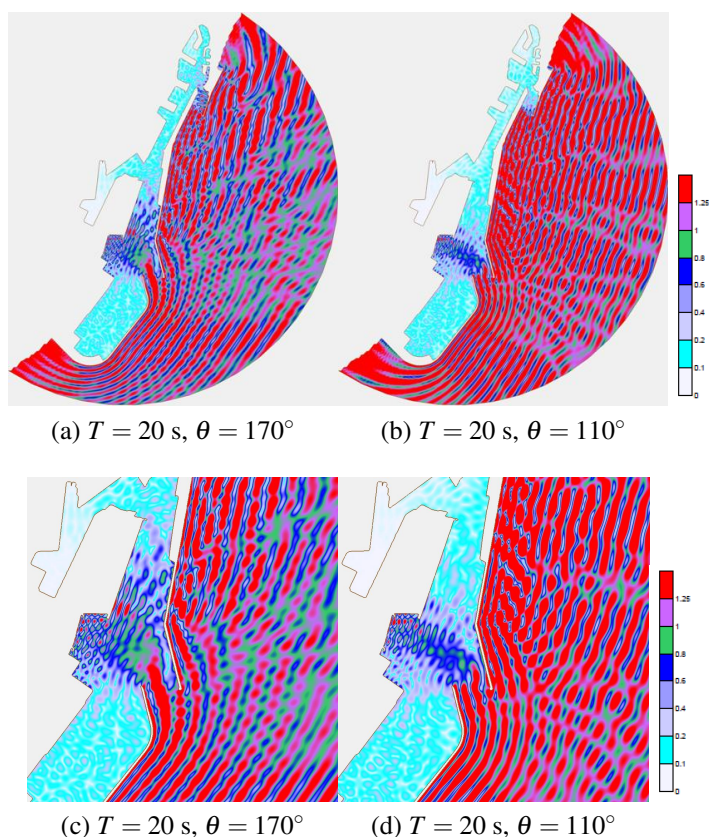


Figura 5.15: Estat d'agitació del port de Barcelona per un episodi amb un període de tempesta.

Per concluir aquesta secció, cal destacar que els dos models semblen tenir una bona solució per l'estudi de l'agitació en el port de Barcelona. Tot i així, com que els resultats tenen valors prou diferents, caldria un anàlisi més ampli per veure quin és el que modela millor la realitat. Amb la informació d'un únic punt no n'hi ha prou per veure quin dels dos és més acurat.

El ventall de simulacions generat per a la plataforma del sistema de predicció d'agitació es pot trobar a l'apèndix A.

## Capítol 6

# Sistema de predicció d'agitació portuària

En aquest capítol es presenta el Sistema de predicció desenvolupat en el port de Barcelona, es descriu la plataforma i es mostra el seu funcionament.

### 6.1 Descripció de la plataforma

En aquesta secció, s'explica quins són els passos que segueix la plataforma per mostrar les prediccions a l'usuari.

Primer de tot, diàriament, SIMO obté les dades de les prediccions del sistema operacional PREVIMER. Llavors, la plataforma del sistema, dissenyada en PHP, treballa de la següent manera: baixa les dades processades de SIMO (si són requerides per l'usuari, és a dir, si hi ha un usuari que consulti aquell dia), a continuació la plataforma llegeix aquestes dades i les relaciona amb la millor aproximació de la base de dades de simulacions de CGWAVE. Tot seguit la mostra a l'usuari. A la Figura 6.1 es pot veure l'esquema operacional que segueix la plataforma.

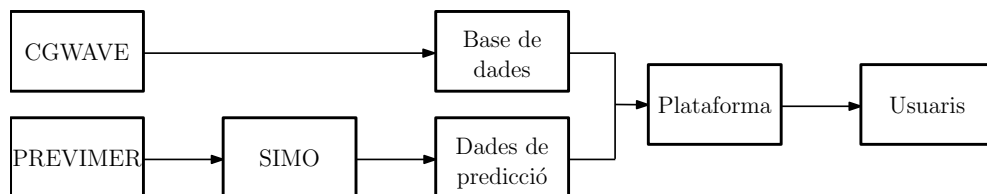


Fig. 6.1: Esquema operacional que segueix la plataforma

Totes les simulacions amb CGWAVE que estan a la base de dades han estat resoltes amb l'alçada d'ona d'un metre i, per tant, la plataforma per mostrar

els resultats de les alçades als diferents punts del port per diferents alçades incidents, ho fa mitjançant la teoria lineal de l'onatge. Aquesta teoria lineal s'ha pogut aplicar tenint en compte la hipòtesi que l'onatge incident segueix un moviment harmònic simple, o sigui lineal. Aquesta hipòtesi és assumida en estudis de l'àmbit de l'enginyeria marítima, quan es vol simplificar i els efectes de la no linealitat són menyspreables.

L'hipòtesi lineal s'ha assumit per reduir el nombre de casos, ja que hi ha una gran ventall d'alçades d'ona incidents a la costa, que s'haurien de modelar i contenir-les a la base de dades. D'aquesta manera, al fer-se amb una alçada unitària, els resultats són obtinguts multiplicant els coeficients unitaris resultants amb l'alçada d'ona incident, obtenint les alçades associades a l'interior del port.

### 6.2 Esquema del sistema operacional

A continuació es presenta un esquema de la pàgina on es mostra com està distribuït i la funció de cada un dels components.

1. Capçalera.
2. Títol de la pàgina.
3. Introducció explicativa dels objectius de la pàgina web.
4. Dia i Hora que l'usuari realitza la consulta.
5. Imatge de la situació d'agitació general de l'hora que l'usuari realitza la consulta.
6. Imatge zoom de l'entrada de la bocana amb l'estat d'agitació de l'hora que l'usuari realitza la consulta.
7. Imatge de l'angle que a l'hora de la consulta està incidint, des del nord.
8. Caixetí de la informació de l'hora de consulta, que conté període, alçada de l'onatge a l'exterior del port i l'angle incident  $(T, H_{ext}, \theta)$ .
9. Mapa de Colors amb la predicció de les alçades resultants, ja aplicada la teoria lineal.
10. Desplegable que conté les hores del dia que l'usuari té disponibles de predicció.

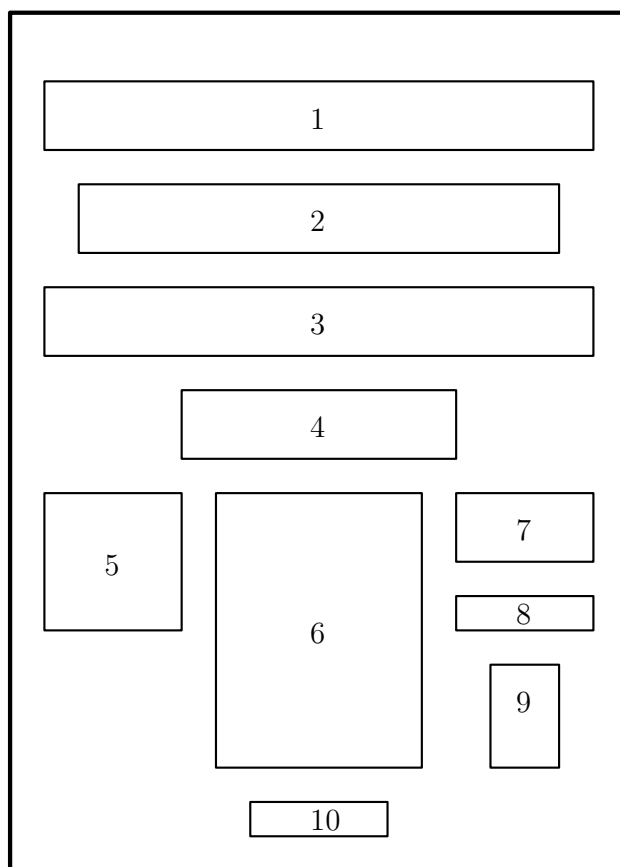


Fig. 6.2: Esquema del sistema operacional

A continuació s'expliquen algunes de les funcions dels components. El número cinc (5), prement doble click s'obre la imatge en majors dimensions per millor visualització i comoditat per l'usuari. El número vuit (8), llegeix les dades que la plataforma descarrega de SIMO per l'hora a la qual es realitza la consulta. El número nou (9), l'índex del mapa varia segons l'alçada de l'ona incident tal com s'explica amb la teoria lineal de l'apartat anterior. El número deu (10), conté una pestanya desplegable que permet a l'usuari accedir a les prediccions de les diferents hores del dia que realitzi la consulta.

### 6.3 Interfície resultant

La interfície del sistema de predicció d'agitació es pot trobar a: [www.agitaciobcn.tk](http://www.agitaciobcn.tk). La contrassenya per poder accedir a la pàgina és: usuari2011.

A la Figura 6.3 es pot veure una instantània de la interfície programada per

## CAPÍTOL 6. SISTEMA DE PREDICCIÓ D'AGITACIÓ PORTUÀRIA

mostrar les prediccions.

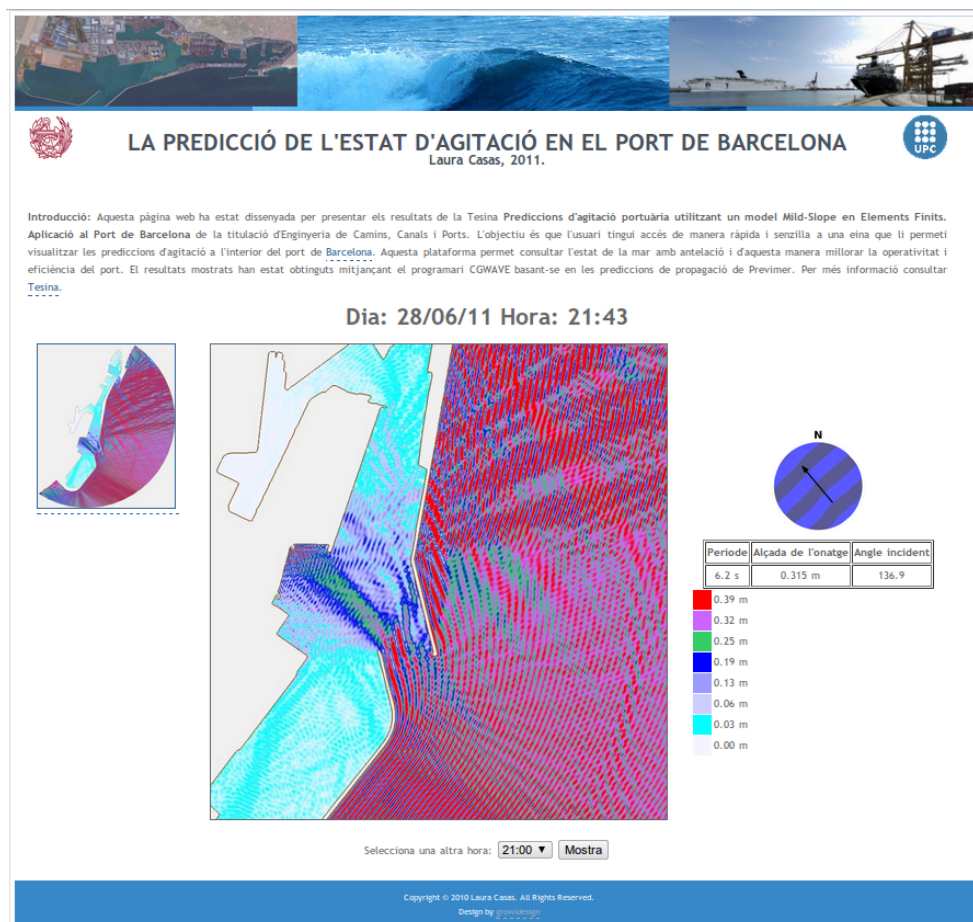


Fig. 6.3: Interfície final del sistema de predicció d'agitació portuària.

El sistema de predicció creat permet accedir a l'estat actual del port. Es tracta d'un sistema innovador a Espanya ja que és el primer sistema que utilitza PREVI-MER com a sistema de predicció de la propagació de l'onatge fins a la proximitat de les costes i CGWAVE per la predicció de l'agitació.

La plataforma creada és potent ja que no només mostra els resultats per pantalla, sinó que és capaç de mostrar a l'usuari a través del mapa de colors les alçades reals previstes al port. D'aquesta manera l'usuari no veu uns coeficients, sinó que ja rep la informació que cerca sense haver de fer cap càlcul.



# Capítol 7

## Conclusions

En aquesta tesina s'ha dut a terme un sistema de predicció de l'agitació portuària del port de Barcelona mitjançant simulacions amb un model Mild-Slope en elements finits. Per poder comparar els resultats obtinguts i validar el model s'han utilitzat dades reals de Puertos del Estado i també s'ha comparat amb les simulacions obtingudes amb un model Boussinesq.

L'estudi de l'agitació és de gran importància a tots els ports. Des dels comercials on és important poder predir l'estat per tenir una bona operativitat i d'aquesta manera evitar pèrdues i costos innecessaris, als ports esportius on hi ha usuaris de tots tipus, novells i experts, que predint l'estat d'agitació es poden estalviar danys i ensurts.

El model utilitzat per crear el sistema de predicció d'agitació portuària ha estat el CGWAVE. Per poder-lo executar s'ha necessitat la batimetria de la zona, els períodes i els angles incidents i una calibració dels paràmetres de reflexió, de trencament d'ones, de fricció de fons i de relació no lineal. L'estudi s'ha realitzat en el port de Barcelona per la possibilitat d'accedir a dades a temps real i de poder-ho comparar amb un model Boussinesq.

Els resultats obtinguts són satisfactoris i fan pensar que l'eina de predicció creada pot tenir uns beneficis pels usuaris del port. Mitjançant la calibració dels coeficients s'ha pogut aconseguir que els valors resultants siguin propers a la realitat. Les dades per la comparació s'han extret del mareògraf i de la boia de Barcelona de Puertos del Estado i es poden consultar diàriament a la seva web. S'ha tractat de consultar dies en els quals hi hagués una mar moguda amb períodes alts, que realment és quan ens interessa predir, però durant l'època en que s'ha realitzat l'estudi la mar ha estat en calma. Tot i així, s'han intentat agafar valors representatius i s'han mirat els resultats. Comparant els valors, veiem que CGWAVE obté resultats amb el mateix ordre de magnitud que les dades registrades, encara que lleugerament inferiors. Aquest petit desajust pot ser degut a fets i a vàries assumpcions fetes en el procés de simulació: diferències de la batimetria treballada

amb l'existent actualment, ajust del coeficient de reflexió o menyspreu d'alguns paràmetres. A continuació, s'intentarà donar les possibles causes i motius pels quals hi ha hagut petites diferències en el resultat.

Primer de tot, per estudiar l'agitació del port s'ha emprat un model capaç de simular linealment, però també, si es desitja i es creu necessari pel cas d'estudi, el model pot tenir en compte la dispersió no lineal. En aquest treball, s'ha optat per la hipòtesi de despreciar els termes no lineals i la fricció de fons després de veure les característiques (alçada i longitud d'ona) de l'onatge incident al port de Barcelona i que la diferència en el resultat no justificava l'increment del cost computacional; en més del doble. Al treballar amb aquesta hipòtesi, els valors d'agitació obtinguts, teòricament, poden ser més elevats que els reals, quedant-nos al costat de la seguretat, tot i que els valors obtinguts en la majoria dels casos han estat menors.

També cal tenir en compte que els coeficients de reflexió utilitzats han estat unificats per falta d'informació. En el port de Barcelona hi ha diferents tipus de dics tal com s'ha explicat en el treball. Per exemple, els dics escollera situats a diferents trams, tenen una pendent diferent i un diàmetre de l'element i material diferent. Aquest fet fa que aquestes estructures segurament tinguin un coeficient de reflexió diferent a l'emprat. Però en no tenir dades de mides i materials, s'ha optat per un coeficient mitjà que pot suposar que en algunes zones del port apareguin diferències amb la realitat.

Un altre fet rellevant que cal tenir en compte per l'anàlisi de resultats és que el port es troba en obres d'ampliació i per tant en un canvi constant de la batimetria i del perfil. Aquest fet ocasiona que la batimetria i el perfil de costa amb la qual s'ha treballat siguin diferents, tant de les utilitzades pels resultats de les simulacions del model LIMPORT com de les del moment del registre de la boia. Els possibles canvis són a les zones d'ampliació i aquest podria ser un altre dels motius pels quals els resultats són diferents.

Respecte el cost computacional, ha estat baix per casos en que el període era pròxim al període associat de la malla, vuit segons. A mesura que el període s'ha anat incrementant, els temps han incrementat severament, tardant en els casos més energètics, més de mitja hora per cas. La precisió és molt bona però excessiva i després de la realització de l'estudi es planteja que per usos futurs, sobretot per tempestes (períodes associats alts), la necessitat de treballar amb més d'una malla per reduir el temps d'execució. Per un període de 15 segons, una malla amb un període de 7 segons simula en aproximadament 40 minuts, en canvi una malla amb un període associat de 15 segons simula en en poc menys d'un minut. La disminució del temps és remarcable.

Un dels punts més complexos del treball ha estat la comparació entre els models CGWAVE i LIMPORT degut a que no s'han tingut prou coneixements per saber com s'han obtinguts els resultats per part del model LIMPORT, cosa que

a fet difícil la posada en comú de les simulacions. Del que s'ha pogut apreciar en la comparació del ventall de casos d'agitació és que ambdós models semblen treballar molt bé, sobretot fins a la zona de la bocana. Però a partir d'allà els dos models es desmarquen i CGWAVE dissipa molta més energia a l'interior. Aquest fet pot ser degut a molts factors, ja que com s'ha dit, es desconeix les condicions de treball amb les que ha estat elaborat l'atles de LIMPORT. Es proposa com a futura línia de treball la comparació dels dos models en diferents punts del port, mitjançant registres de dades reals, per veure quin dels dos models simula més proper a la realitat i poder treballar en la seva millora.

Respecte el ventall de simulacions realitzades amb CGWAVE, presentades a l'apèndix A, que han servit per crear la base de dades del Sistema de Predicció, es pot observar que, a mesura que el període s'incrementa, l'onatge és més energètic i hi ha més agitació al port segons d'on provingui l'onatge, ja que els dics fan que es dissipin la energia incident aconseguint que el port entri un onatge calmat. Cal destacar, que quan l'onatge incideix amb un angle directe cap a la bocana – onatge provinent del Sud ( $160^{\circ}$ - $170^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ) – a l'estar l'entrada del port menys protegida, és quan es registra major agitació sobretot en aquest primer tram d'aigües abrigades i és quan s'ha de tenir més en compte a les operacions que s'hagin de dur a terme.

Cal destacar que aquest model no ha permès generar una malla per períodes inferiors a vuit (8) segons, cosa que fa que l'estudi de les ones per sota d'aquest període tingui uns resultats menys fiables. Els resultats obtinguts amb períodes associats menors a aquest valor, poden tenir una manca de resolució a la malla, i per tant, menys precisió en els resultats obtinguts. D'altra banda, cal pensar que els episodis d'intensa agitació es donen per períodes alts amb grans tempestes, i que per tant, per sota de vuit segons no tindrem tempestes energètiques per les quals l'operativitat del port pugui quedar afectada.

De totes maneres, aquesta limitació ve donada per la gran extensió que ocupa el port de Barcelona. CGWAVE té una limitació de 800000 elements i per tant la malla generada no ha pogut ser més petita. Recordem que amb un període associat de 8 segons, el nombre d'elements és de 794564. Per tant, per futurs estudis en altres ports, com poden ser esportius, si l'extensió del port no és tan gran (el port de Barcelona abarca aproximadament 9,5 km de costa), l'estudi d'agitació es podrà dur a terme amb precisió per períodes menors, com per exemple 4 i 5 segons.

La interfície gràfica amb la que treballa CGWAVE, SMS, és una eina amb un gran valor per dur a terme pre-processament de dades en modelatge numèric. Es pot treballar amb diferents aplicacions per l'àmbit marítim i hidràulic. Ofereix un gran ventall de possibilitats per mostrar els resultats i per la seva extracció.

Es conclou que el programari CGWAVE és adient per l'estudi de l'agitació portuària encara que els valors obtinguts en alguns casos varien respecte les dades

registrades pel mareògraf. L'assumpció d'algunes hipòtesis exposades anteriorment poden haver afectat al resultat però es desconeixen les causes concretes. Cal destacar que possiblement no siguin els únics motius de la petita divergència de resultats. Es requereix aprofundir més per tal d'investigar totes les causes de les diferències obtingudes.

El sistema de predicció creat és una eina que permet, d'una manera fàcil, l'accés al coneixement de l'estat actual del port. Es tracta d'un sistema innovador a l'Estat ja que és el primer sistema que utilitza PREVIMER com a sistema de predicció de la propagació de l'onatge fins a la proximitat de les costes. També es tracta d'un sistema precursor a Espanya en utilitzar el programari CGWAVE. Una vegada vistos i analitzats els resultats es conclou que és un sistema competitiu amb els existents.

La plataforma creada és potent ja que no només mostra els resultats per pantalla, sinó que és capaç de mostrar a l'usuari a través del mapa de colors les alçades reals previstes al port gràcies al fet que aplica la teoria lineal en temps real en agafar les dades de SIMO i la base de simulacions de CGWAVE. D'aquesta manera l'usuari no veu uns coeficients i ha de treballar amb el que li mostra el sistema, sinó que ja rep la informació que cerca a la primera sense haver de fer cap càlcul.

Per futures ampliacions, es podria estendre el seu ús oferint més informació que fos útil per l'usuari. Per exemple es podria treballar en oferir les velocitats lineals de l'onatge incident al port o de l'estat de pressions en què es troba, resultats que també es poden obtenir amb CGWAVE.

A Catalunya trobem una gran quantitat de ports esportius, que poden veure's sotmesos a grans temporals i poden patir intensos episodis d'agitació. En aquest tipus de ports, on les embarcacions són de dimensions reduïdes, poden patir danys amb episodis d'agitació menys intensos que en el cas del port de Barcelona. Seria interessant que aquest tipus d'estudi es comencés a estendre a aquest tipus de ports per dotar de millors garanties de seguretat als usuaris i treballadors.

L'estudi realitzat obre les portes a seguir treballant en aquest model i a obtenir noves eines que ajudin a la seva calibració. És interessant en un futur, que el port disposi de més punts de control de l'agitació que podran donar més referències de cara a ajustar millor els paràmetres, ja que queda justificat que aquest sistema de predicció és una eina indispensable en ports amb un gran nivell de negoci. I un únic punt de control és insuficient per poder garantir en la totalitat un servei de predicció d'agitació a nivell empresarial.

Un altre punt interessant a desenvolupar en un futur seria un estudi més detallat dels coeficients de reflexió del port i del possible trencament d'ones en aquella zona, ja que permetria la millor calibració del model i s'obtingrien resultats més ajustats.

# Bibliografia

- [1] Iñigo J. Losada and Philip L.F. Liu. Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria. *Estudios e Investigaciones Marinas*, 1: 47–67, 2000.
- [2] Wikimedia Commons, 2011. URL `\url{http://www.wikipedia.org/}`. [Online; accessed March-2011].
- [3] R. G. Dean and R.A. Dalrymple. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Prentice-Hall, Inc, 1984.
- [4] Edward F. Thompson and H.S. Chen. Validation of numerical model for wind waves and swell in harbors. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 122, 1996.
- [5] Leo H. Holthuijsen. Waves in shallow water. In *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. World Meteorological Organization, second edition, 1998. URL `http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/WMO%20No%20702/WMO702.pdf`.
- [6] Francisco-Javier Sayas. A gentle introduction to the finite element method. Technical report, University of Minnesota, 2008. URL `http://www.math.umn.edu/~sayas002/anIntro2FEM.pdf`.
- [7] Daniel Green and William G. Unruh. The failure of the tacoma bridge: A physical model. *American Journal of Physics*, 74:706, 2006.
- [8] Daniel Gonzalez Marco. *Modelado Numérico de la Propagación del oleaje. Una herramienta para la ingeniería marítima y la predicción operativa*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [9] C.R. Iribarren and C. Nogales. Protection des ports. In *XVIIth International Navigation congress, Section II. Communication*, pages 31–80, 1949.

- [10] Coastal Engineering Research Center. *Shore Protection Manual*, volume v.1. Vicksburg, Miss. :Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center ;, 1984. 652 pp.
- [11] A. Sommerfeld. *Partial Differential Equations in Physics*. Academic Press, 1949.
- [12] D. E. Hasselmann, M. Dunkel, and J. A. Ewing. Directional wave spectra observed during jonswap 1973. *Journal of Physical Oceanography*, 10: 1264–1280, 1980.
- [13] Carl Eckart. The propagation of gravity waves from deep to shallow water. In *Proceedings of the NBS Semicentennial Symposium on Gravity Waves*, 1952.
- [14] J.C.W. Berkhoff. Computation of combined refraction-diffraction. In *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*, pages 796–814, 1972.
- [15] J.C.W. Berkhoff. *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: Wave diffraction and refraction*. PhD thesis, Delft Hydraulics Lab, 1976.
- [16] N. Booij. A note on the accuracy of the mild-slope equation. *Coastal Engineering Journal*, 7:191–203, 1983.
- [17] R. Courant, K. Friedrichs, and H. Lewy. über die partiellen differenzengleichungen der mathematischen physik. *Mathematische Annalen*, 100:32–74, 1928.
- [18] R. Courant, K. Friedrichs, and H. Lewy. On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal*, pages 215–234, 1967.
- [19] B. A. Ebersole. Refraction-diffraction model for linear water waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111:989–953, 1985.
- [20] F. J. Rivero and A. Sánchez-Arcilla. Propagation of linear gravity waves over slowly varying depth and currents. In *Proceedings of the International Conference WAVES'93, ASCE*, 1993.
- [21] J. Nicholson, I. Broker, J. A. Roelvink, D. Price, J.M. Tanguy, and L. Moreno. Intercomparison of coastal area morphodynamic models. *Coastal Engineering Journal*, 31:97–123, 1997.

- [22] M. J. Boussinesq. Theorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce cal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de Mathematique Pures et Appliquees deuxieme serie*, 17:55–108, 1872.
- [23] D. H. Peregrine. Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 27: 815–882, 1967.
- [24] P. A. Madsen, R. Murray, and O. R. Sorensen. A new form of the boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. *Coastal Engineering Journal*, 15:371–388, 1991.
- [25] O. Nwogu. An alternative form of the boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119:618–632, 1993.
- [26] Y. Chen and P. L.-F. Liu. Modified boussinesq equations and associated parabolic models for water wave propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, 288:351–381, 1995.
- [27] J. L. Zelt. The run-up of non breaking and breaking solitary waves. *Coastal Engineering Journal*, 15:205–246, 1991.
- [28] E. C. Cruz, M. Isobe, and A. Watanabe. Boussinesq equation for waves transformation on porous beds. *Coastal Engineering Journal*, 30:125–156, 1997.
- [29] S.-C. Hsiao, P. L.-F. Liu, Y. Chen, and S. Chun. Nonlinear water waves over a permeable bed. In *Proceedings Real Society London*, volume 458, pages 1291–1322, 2002.
- [30] P. L.-F. Liu. Model equations for wave propagation from deep to shallow water. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, 1:125–158, 1994.
- [31] G. Wei and J. T. Kirby. Time-dependent numerical code for extended boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121:251–261, 1995.
- [32] P. L.-F. Liu and I. J. Lossada. El modelado matemático de la propagación del oleaje en ingeniería de costas. *Ingeniería del Agua*, 7:37–46, 2000.
- [33] Juan Carlos Carretero Albiac and Marta Gómez Lahoz. Puertos del estado preparará una red de sistemas locales de predicción de oleaje. *puertos*, 97, 2002.

- [34] Sistema de Predicción Local de Oleaje (SAPO) en las Autoridades Portuarias, 2011. URL <http://w3.puertos.es/externo/clima/Sapo/index.html>. [Online; accessed June-2011].
- [35] N. Booij, L. H. Holthuijsen, and R. C. Ris. The “swan” wave model for shallow water. In *Coastal Engineering*, 1996.
- [36] Sistema de Predicción Local de Oleaje para Barcelona, 2011. URL <http://w3.puertos.es/externo/clima/Sapo/d.barcelona/sapo.html>. [Online; accessed June-2011].
- [37] Dongcheng Li. *Los Angeles-Long Beach Harbor pier 400 Harbor Resonance study using Numerical Model, CGWAVE*. PhD thesis, University of Maine, 2002. URL [www.library.umaine.edu/theses/pdf/LiD2002.pdf](http://www.library.umaine.edu/theses/pdf/LiD2002.pdf).
- [38] Nishchey Chhabra. *Application of Numerical Model CGWAVE for Wave Prediction at Ponce de Leon Inlet, Florida, USA*. PhD thesis, University of Maine, 2004. URL [www.library.umaine.edu/theses/pdf/ChhabraN2004.pdf](http://www.library.umaine.edu/theses/pdf/ChhabraN2004.pdf).
- [39] Barbara P. Donnell Michael J. Briggs and Zeki Demirbilek. How to Use CGWAVE with SMS: An Example for Tedious Creek Small Craft Harbor. Technical report, US Army Corps of Engineers, 2004. URL <http://chl.erd.usace.army.mil/library/publications/chetn/pdf/chetn-i-68.pdf>.
- [40] R. A. Dalrymple, J. T. Kirby, and P. A. Hwang. Wave diffraction due to areas of high energy dissipation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 110:67–79, 1984.
- [41] H. S. Chen. Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering. *Applied Ocean Research*, 8:99–104, 1986.
- [42] P. L.-F. Liu and T.-K. Tsay. Numerical prediction of wave transformation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111:843–855, 1985.
- [43] O.S. Madsen. *Wave Climate of the Continental Margin*, chapter Elements of its Mathematical Description, Marine Sediment Transport and Environmental Management, pages 65–87. John Wiley, 1976.
- [44] W. R. Dally, R. G. Dean, and R. A. Dalrymple. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. *Journal of Geophysical Research*, 90:1917–1927, 1985.

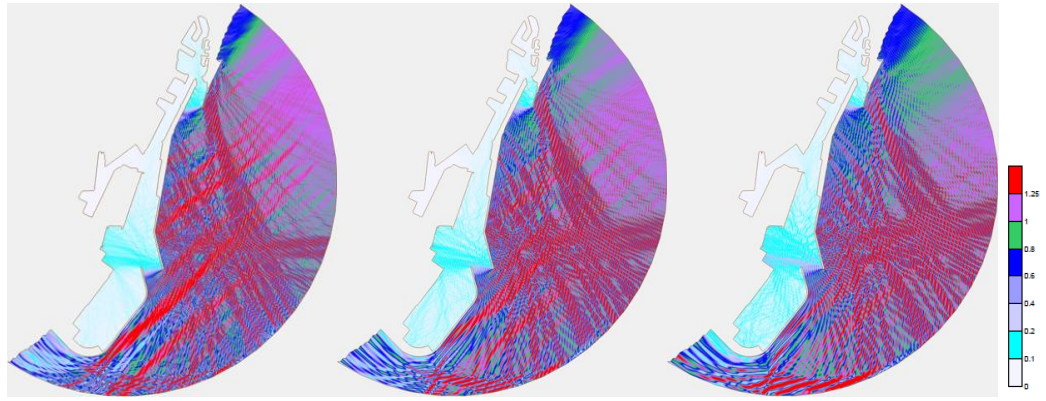


- [45] P. De Girolamo, J. K. Kostense, and M. W. Dingemans. Inclusion of wave breaking in a mild-slope model. In Schrefler and Zienkiewicz, editors, *Computer Modeling in Ocean Engineering*, pages 221–229. Balkema, 1988.
- [46] Zeki Demirebilek and Vijay Panchang. CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation. Technical report, U.S. Army Corps of Engineers, 1998. URL [http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/3/5/3/cgwave\\_man3.pdf](http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/3/5/3/cgwave_man3.pdf).
- [47] V. G. Panchang B. Xu and Z. Demirebilek. Exterior reflections in elliptic harbor wave models. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 122:118–126, 1996.
- [48] Vijay Panchang and Z. Demirebilek. Advances in coastal and ocean engineering. In Philip L.-F. Liu, editor, *Simulation of Waves in Harbors Using Two-Dimensional Elliptic Equation Models*, volume 7. World Scientific, 2001. URL <http://sms.aquaveo.com/Advances%20Coastal%20&%20Ocean%20Engg.pdf>.
- [49] V. G. Panchang, B. Xu, Z. Demirebilek, K. Schlenker, and M. Okihiro. Effects of exterior bathymetry in elliptic harbor wave models. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126:71–78, 2000.
- [50] Xarxa d’instruments oceanogràfics i meteorològics, Gener 2011. URL <http://www.xiom.cat>.
- [51] Puertos del estado, Gener 2011. URL <http://www.puertos.es>.
- [52] Google Inc. Google earth 6, 2011. URL <http://earth.google.com>. [Online; accessed June-2011].
- [53] Stephen G. and Ariela Sofer Nash. *Linear and Nonlinear Programming*. McGraw-Hill Higher Education, 1995.
- [54] Aquaveo. The Surface-water Modeling Solution, 2011. URL <http://www.aquaveo.com/sms>. [Online; accessed June-2011].
- [55] Soluciones Ingeniería Marítima Operacional, 2011. URL <http://www.simo.cat/>. [Online; accessed June-2011].
- [56] H. L. Tolman. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Technical Report 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2002.

- [57] Rudy Magne, Fabrice Ardhuin, and Aaron Roland. Prévisions et rejeux des états de mer du globe à la plage. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14:149–162, 2010.
- [58] PHP: Hypertext Preprocessor, 2011. URL `\url{http://www.php.net/}`. [Online; accessed May-2011].
- [59] Laboratori d’Enginyeria Marítima. Atlas de agitación portuaria y riesgos ambientales. Puerto de Barcelona. Technical report, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010. Versión preliminar.

## **Apèndix A**

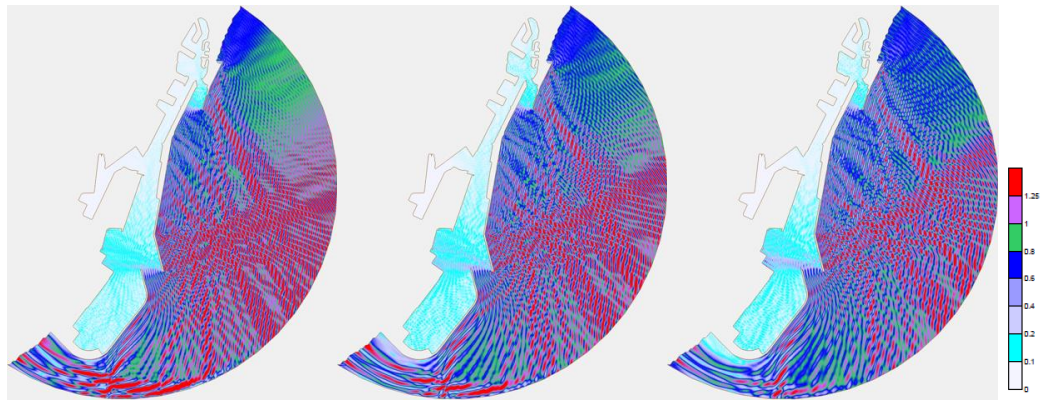
### **Figures**



(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$

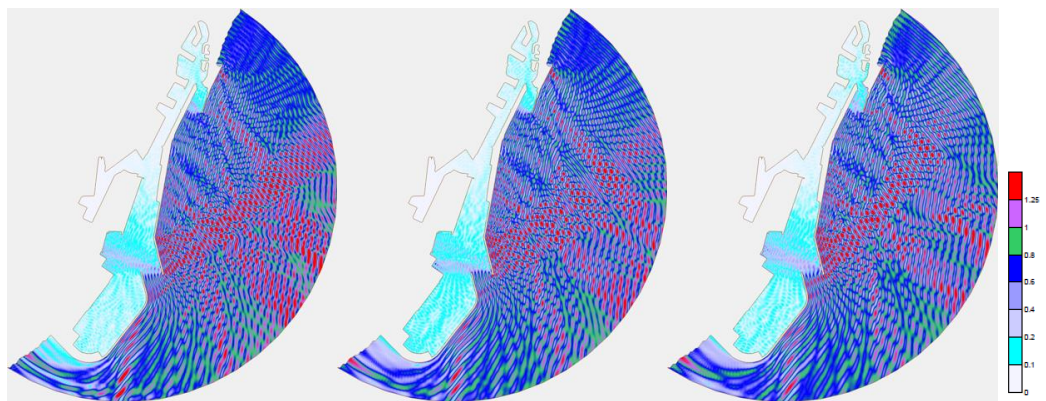
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$

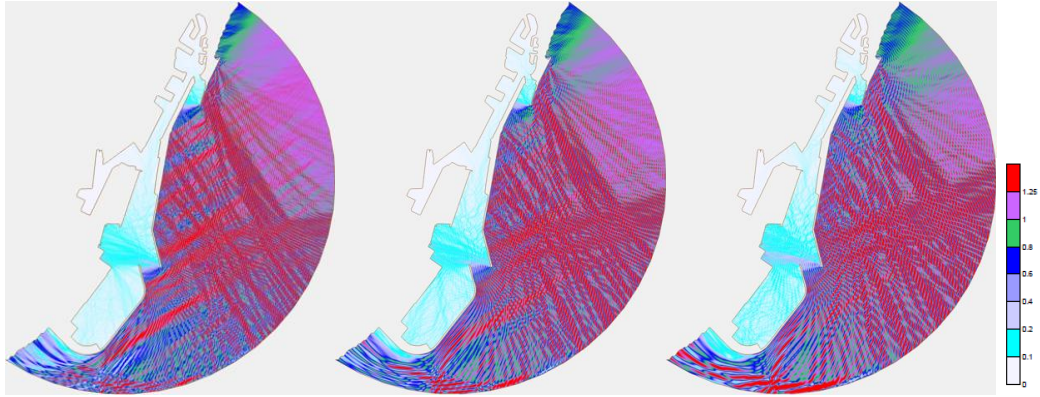
(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$



(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$

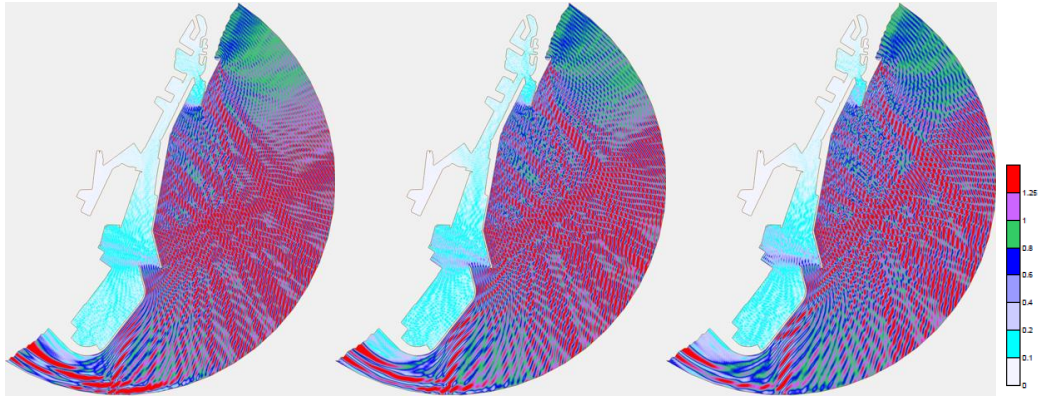
(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 50^\circ$



(a)  $T = 7 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

(b)  $T = 8 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

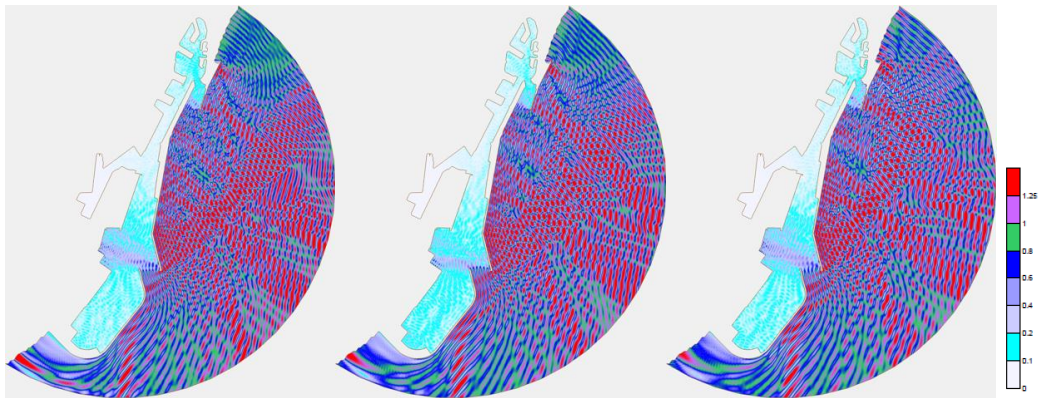
(c)  $T = 9 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$



(d)  $T = 10 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

(e)  $T = 11 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

(f)  $T = 12 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

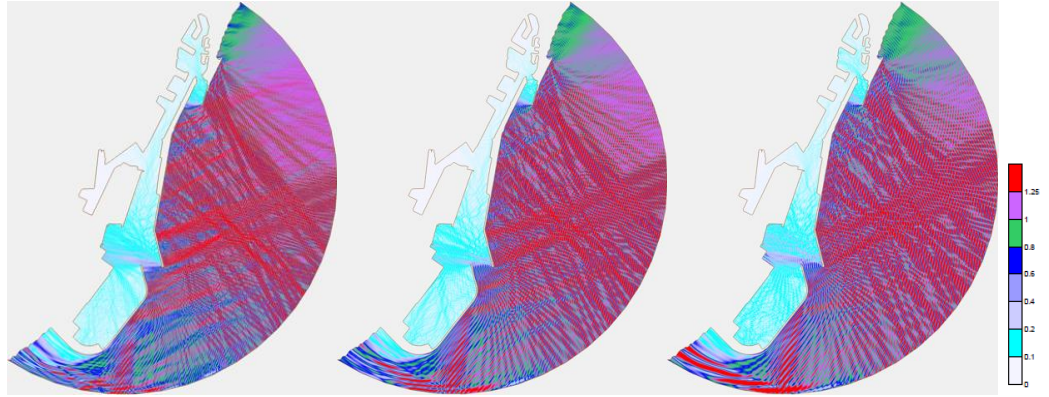


(g)  $T = 13 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

(h)  $T = 14 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

(i)  $T = 15 \text{ s}$ ,  $\theta = 60^\circ$

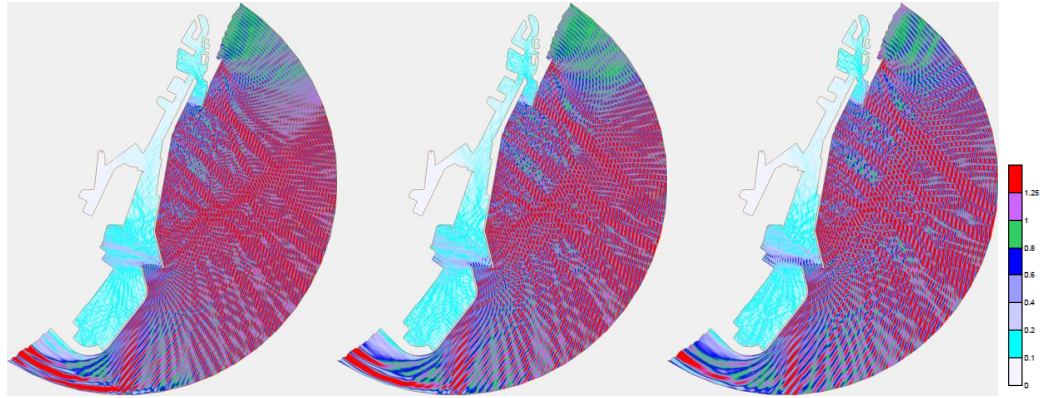




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$

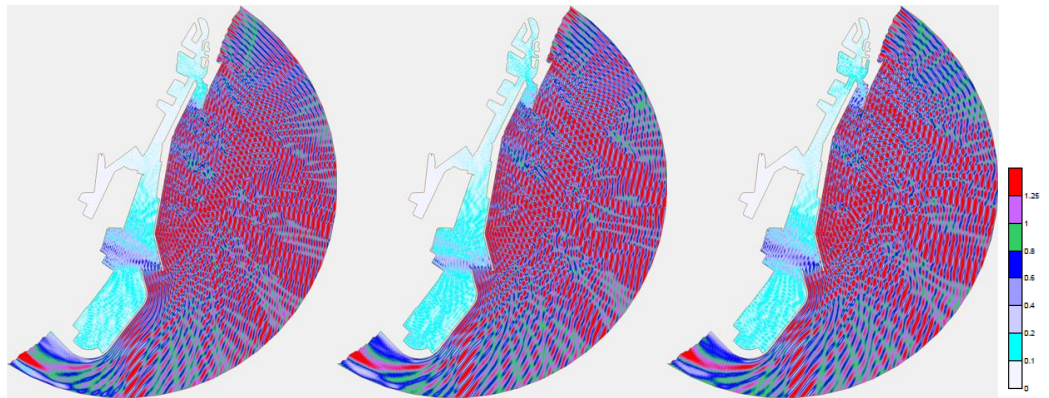
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$

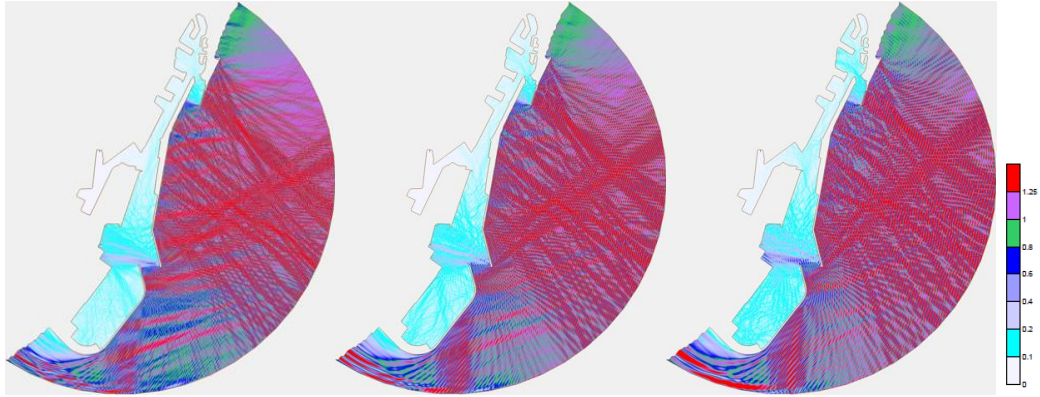
(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$



(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$

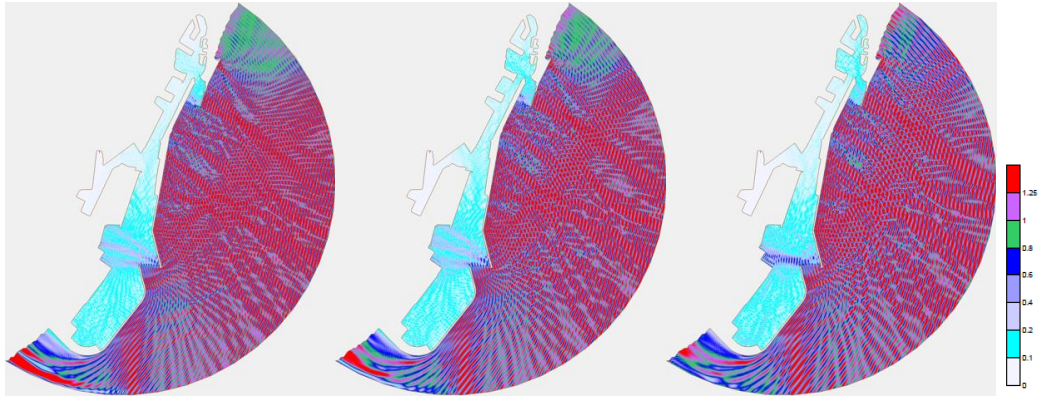
(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 70^\circ$



(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

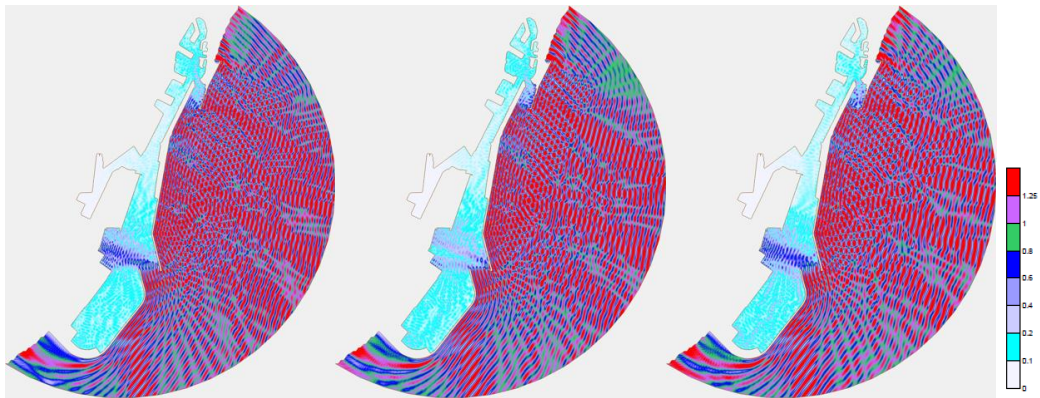
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

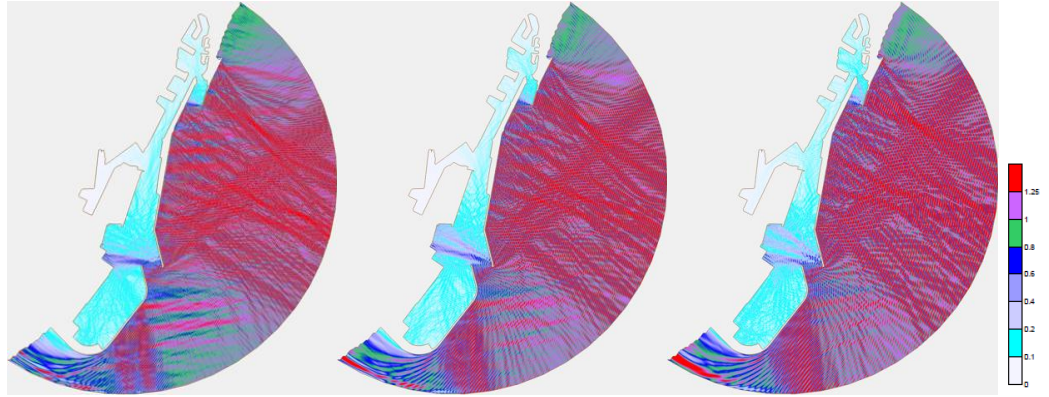


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 80^\circ$

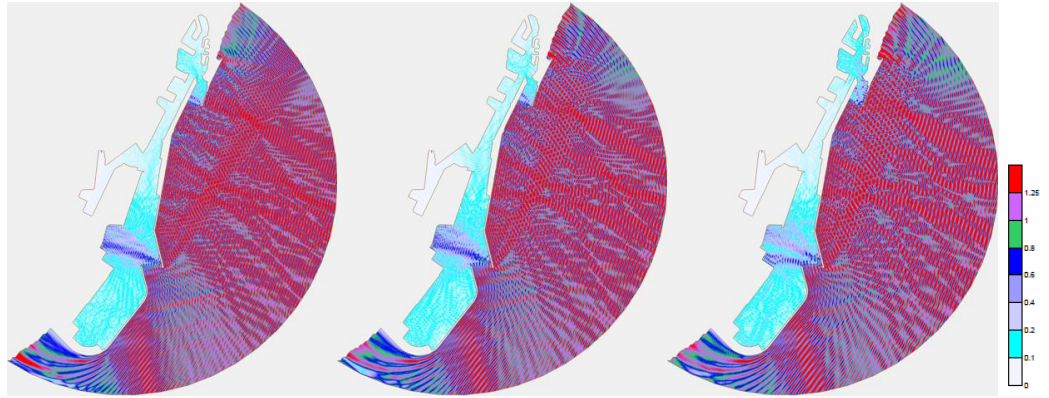




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

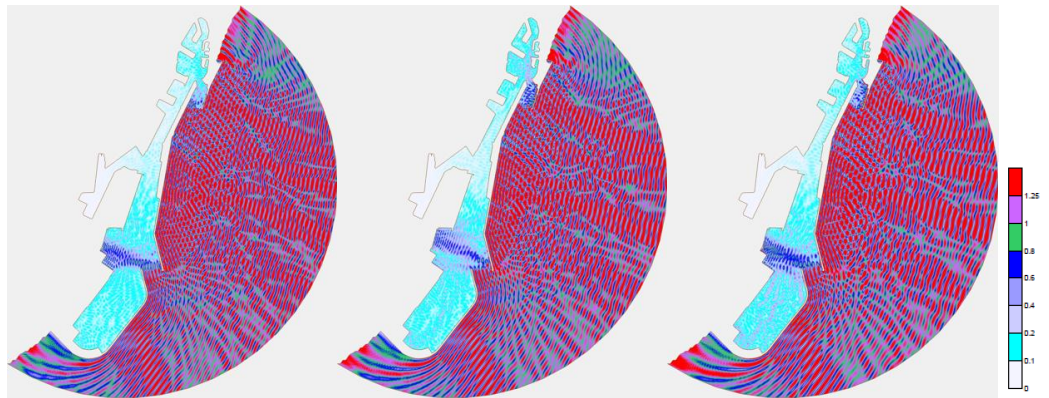
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

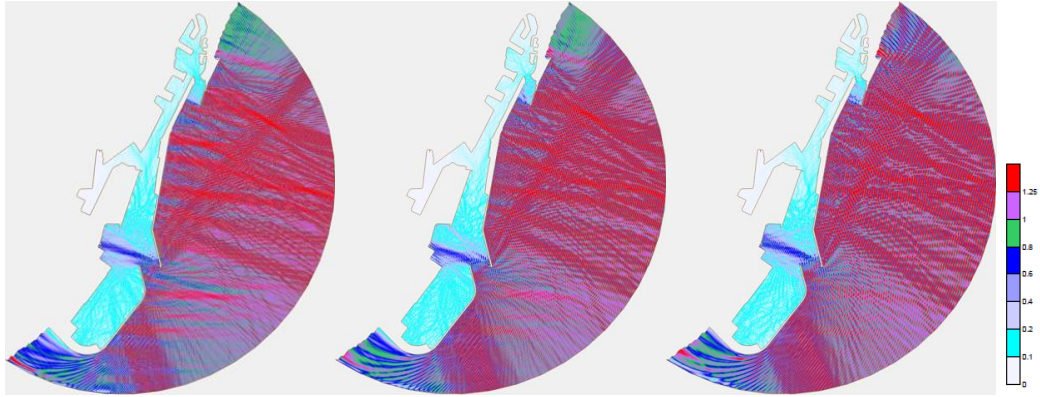


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 90^\circ$

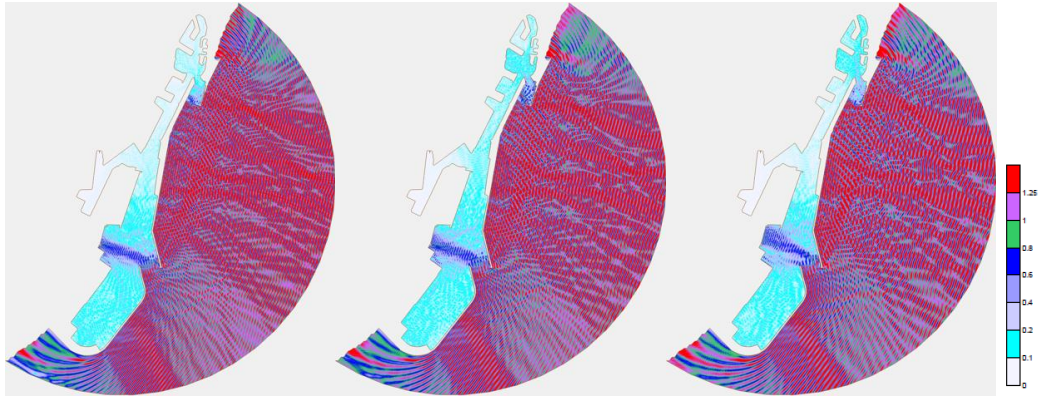




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$

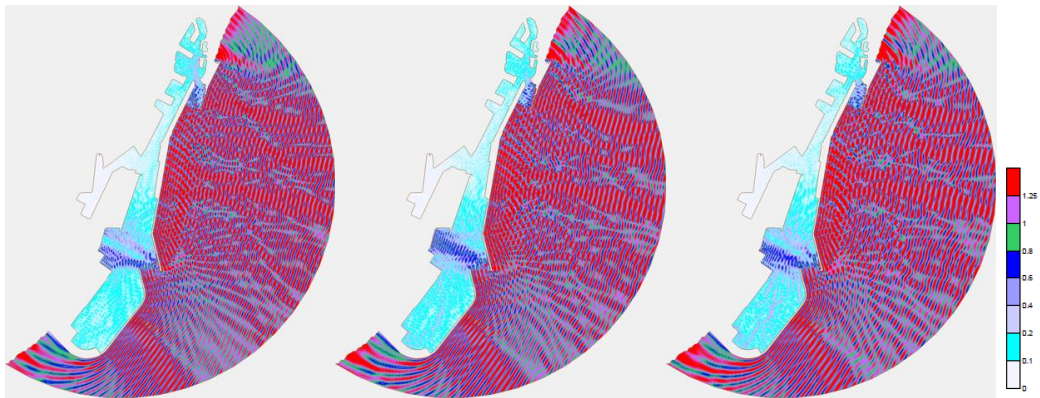
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$

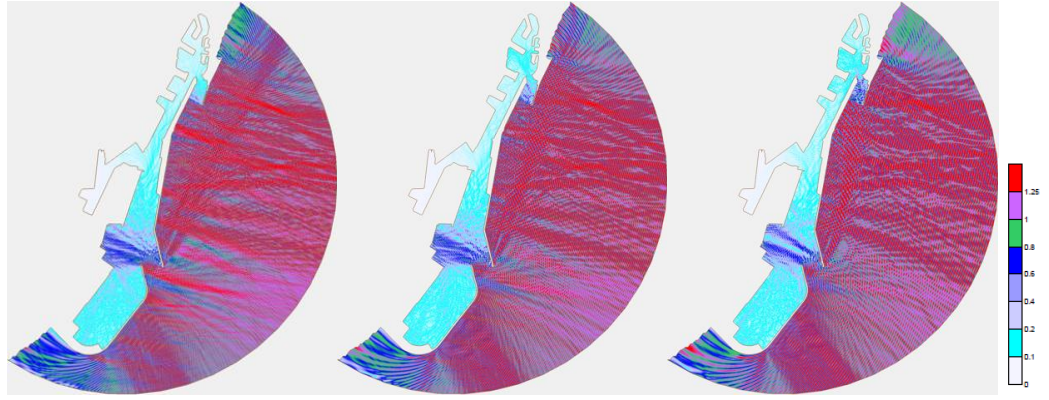
(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$



(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$

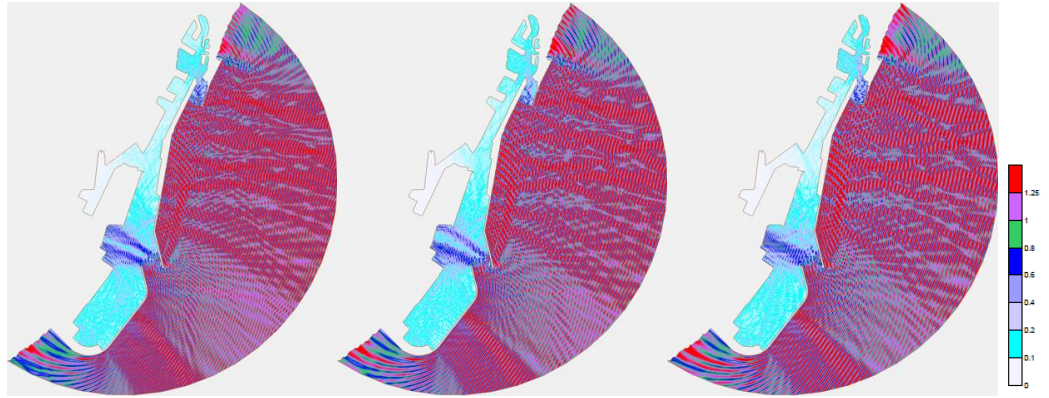
(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 100^\circ$



(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

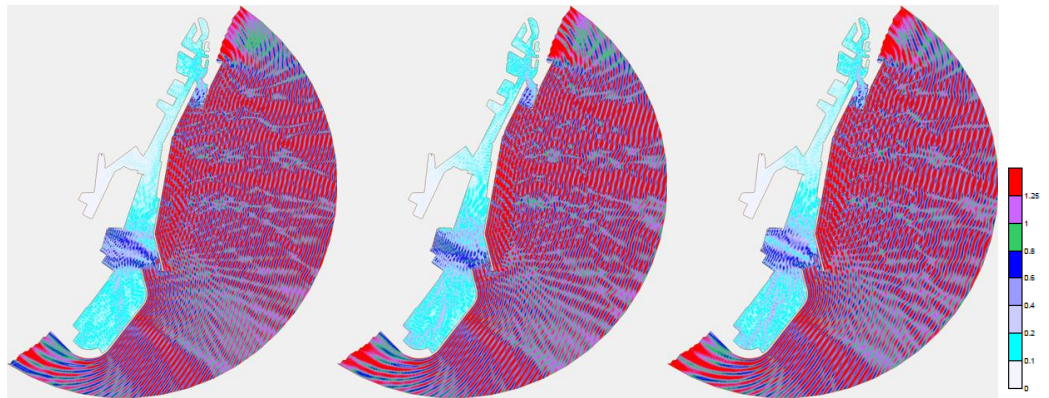
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

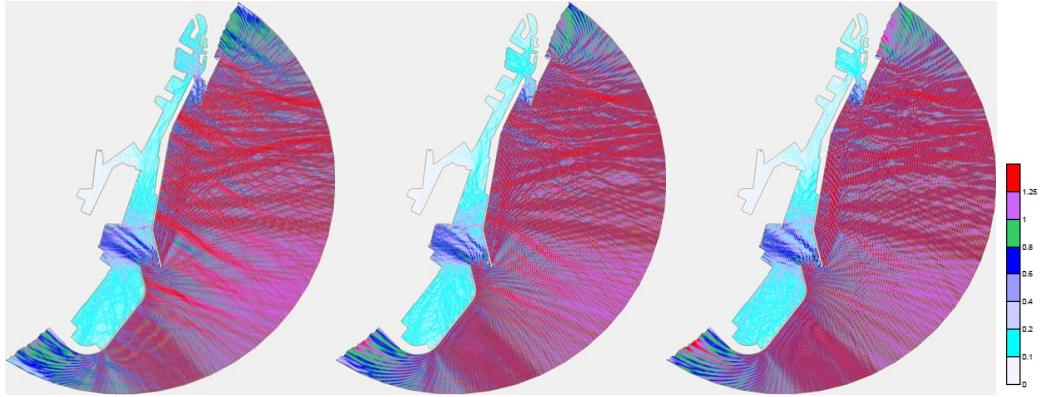


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 110^\circ$

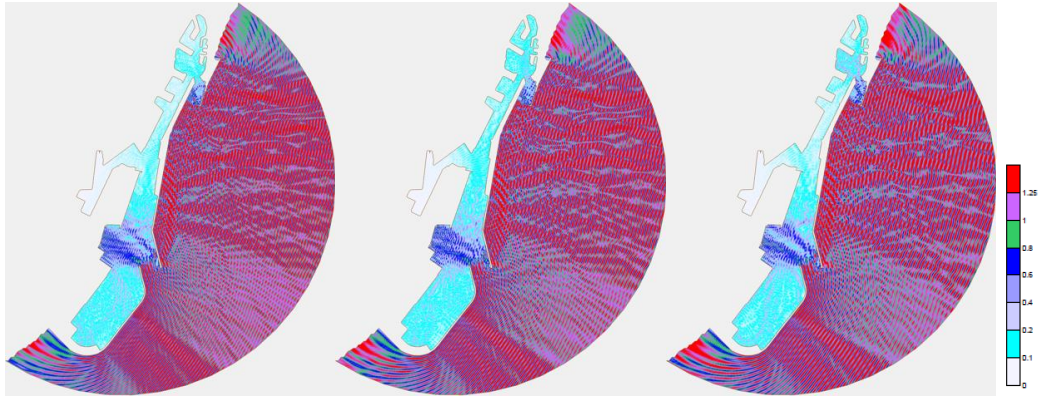




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 120^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 120^\circ$

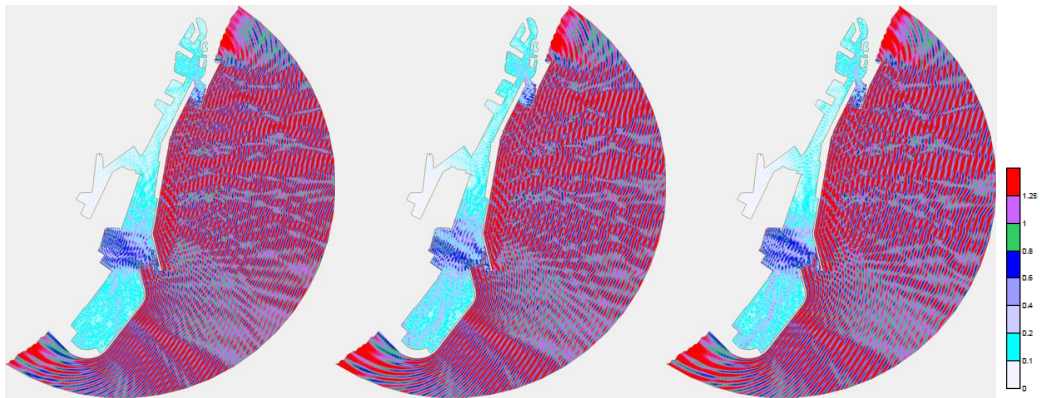
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 120^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 120^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 120^\circ$

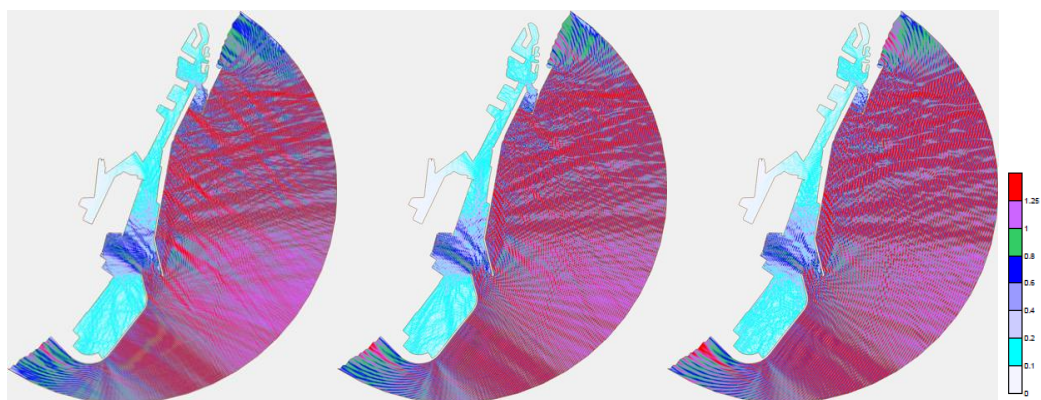
(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 120^\circ$



(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 120^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 120^\circ$

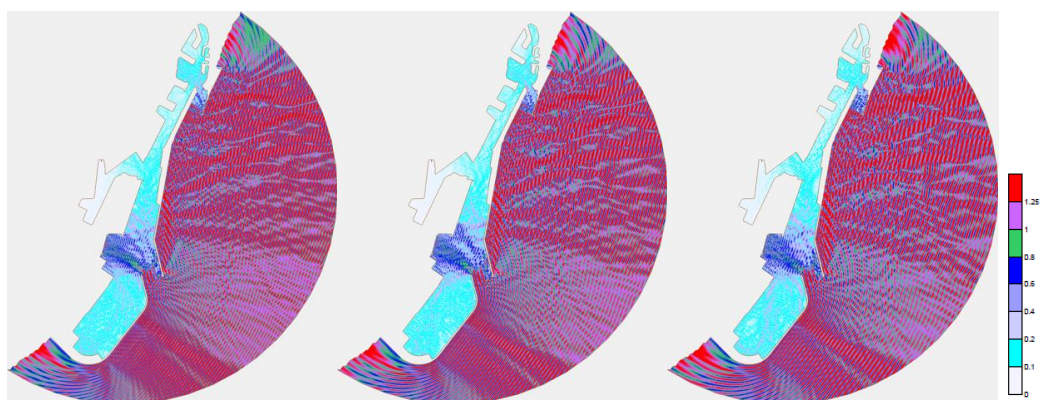
(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 120^\circ$



(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 130^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 130^\circ$

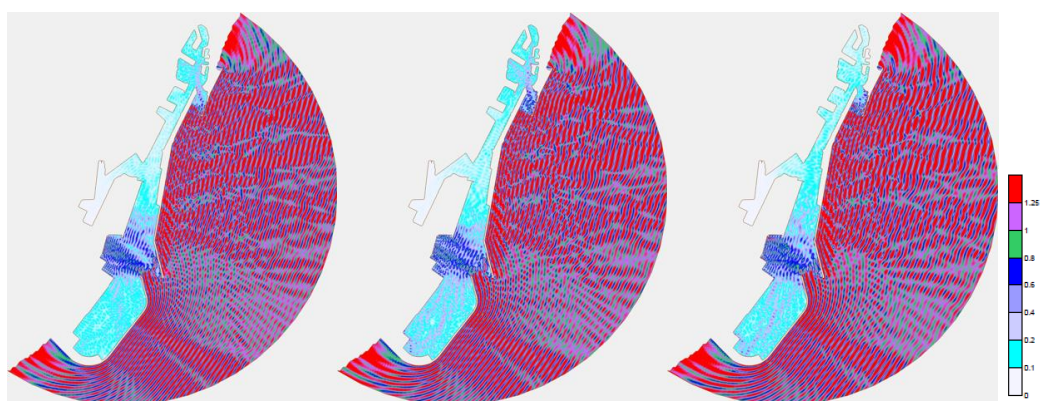
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 130^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 130^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 130^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 130^\circ$

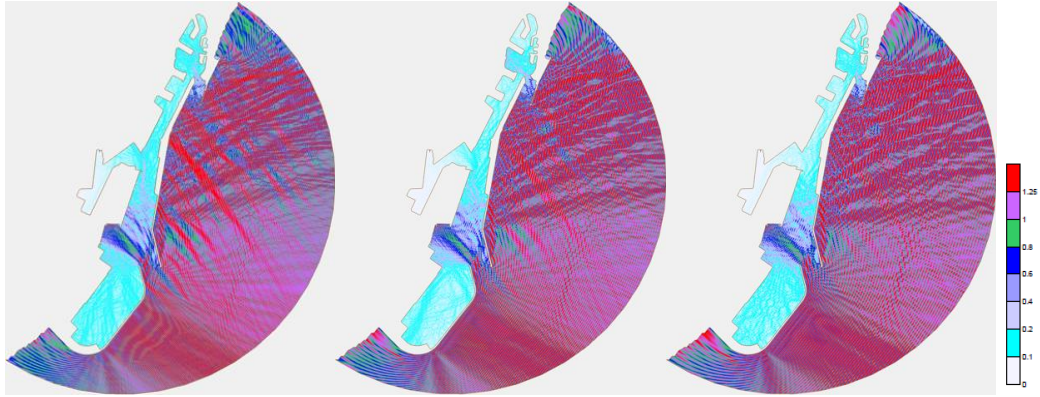


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 130^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 130^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 130^\circ$

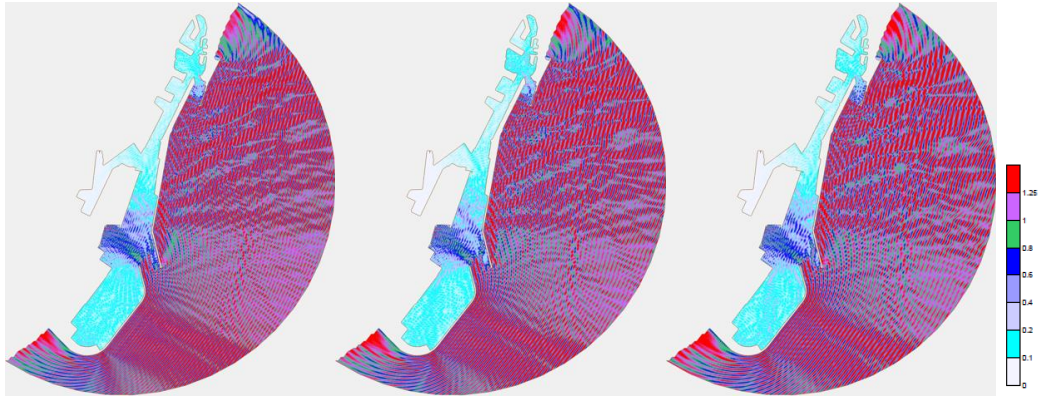




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

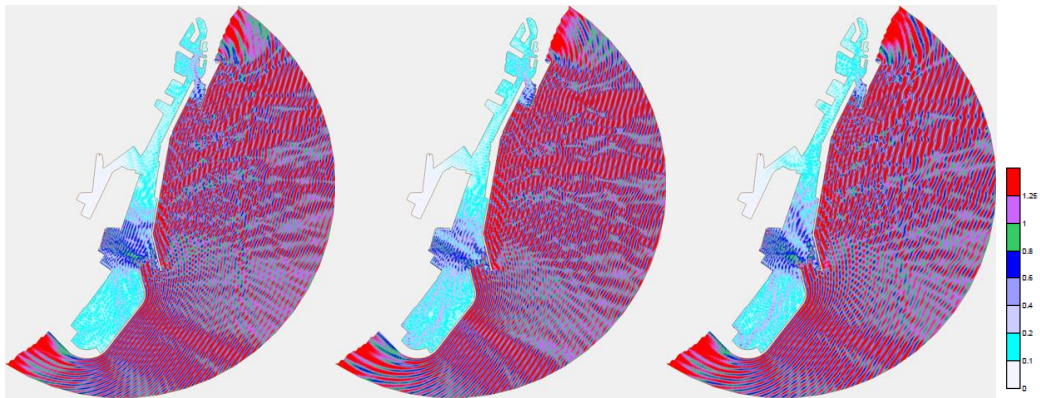
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

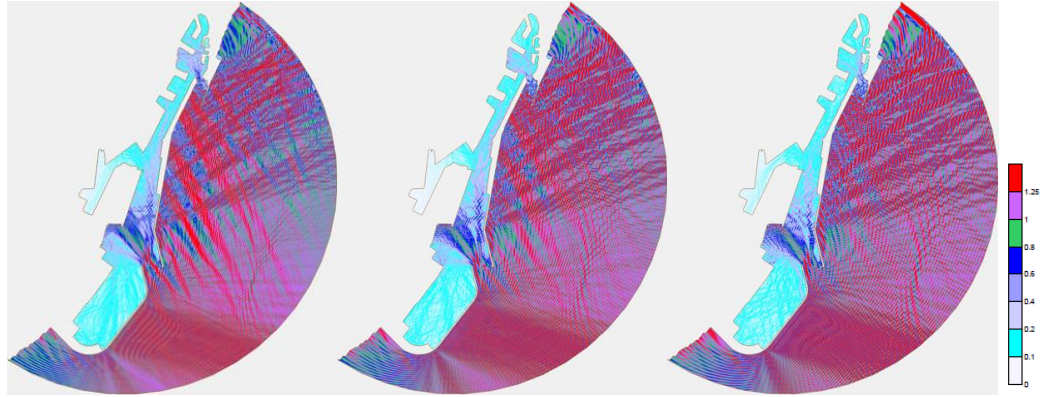
(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$



(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

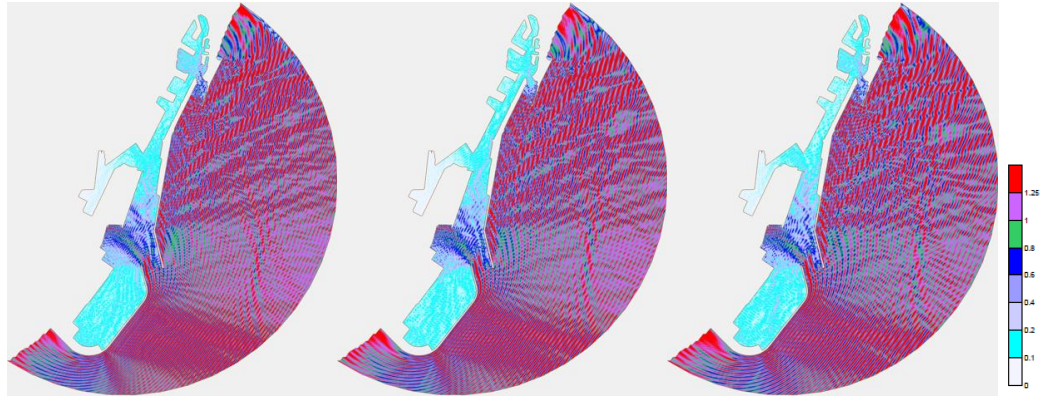
(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$



(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 150^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 150^\circ$

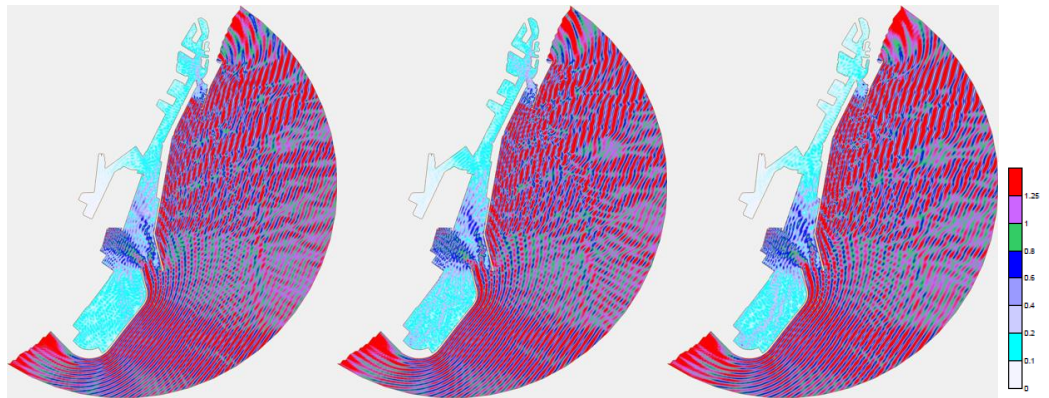
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 150^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 150^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 150^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 150^\circ$

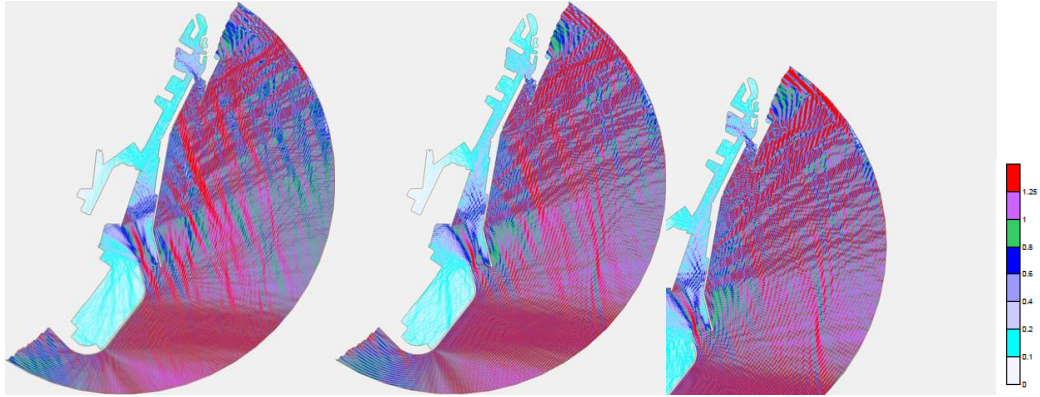


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 150^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 150^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 150^\circ$

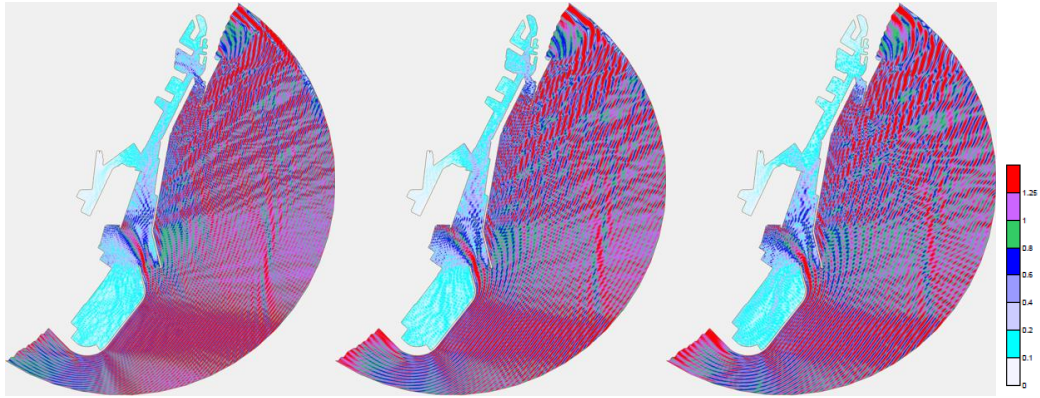




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 160^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 160^\circ$

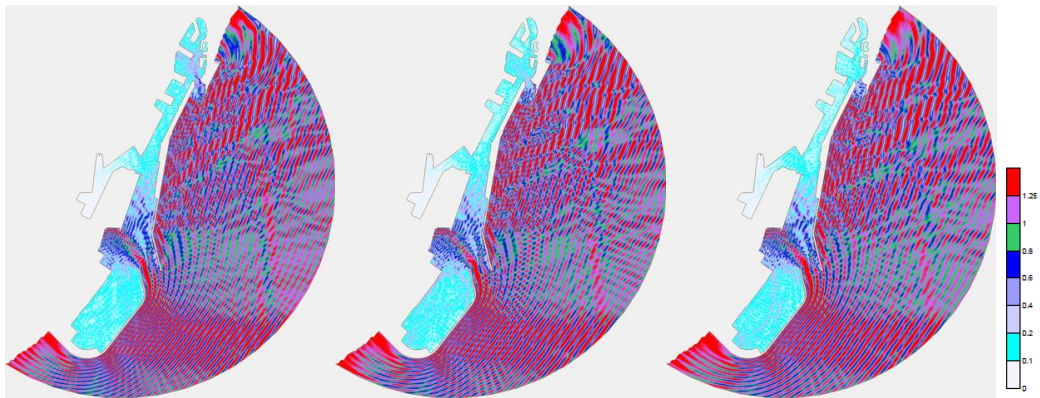
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 160^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 160^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 160^\circ$

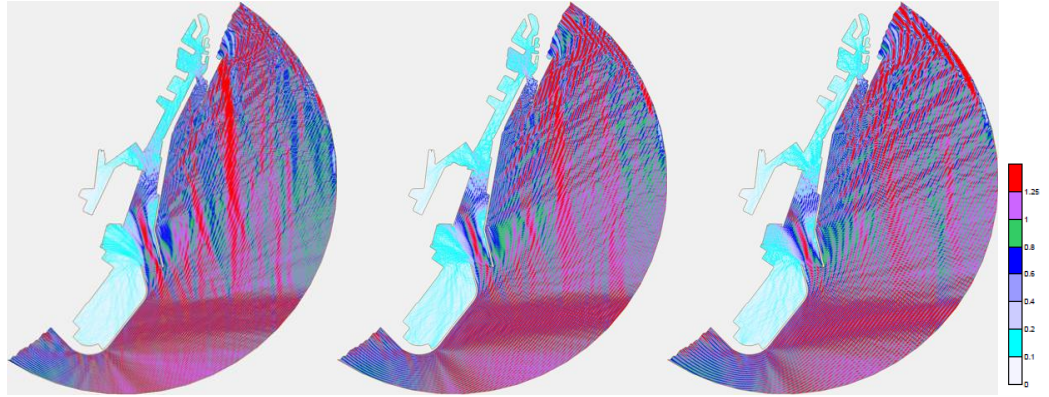
(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 160^\circ$



(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 160^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 160^\circ$

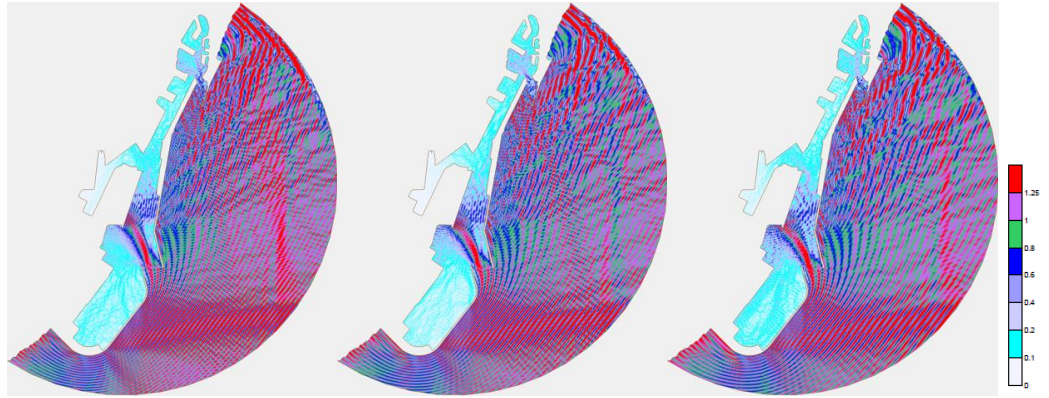
(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 160^\circ$



(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 170^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 170^\circ$

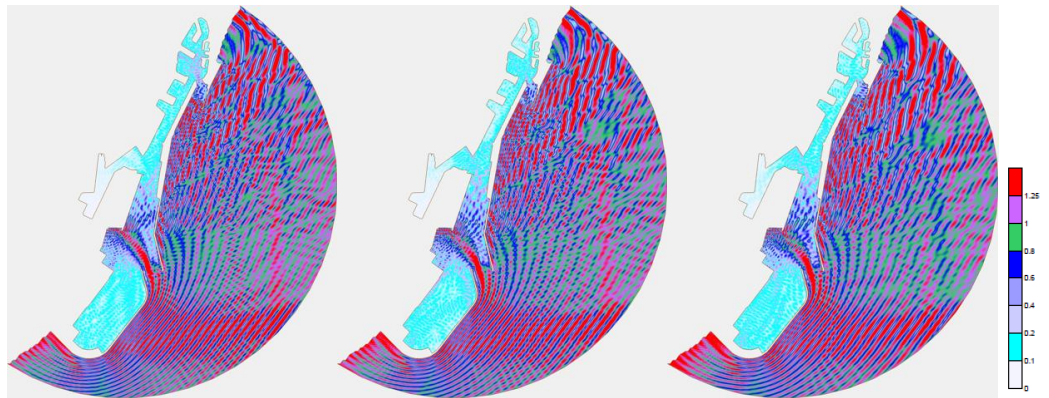
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 170^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 170^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 170^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 170^\circ$

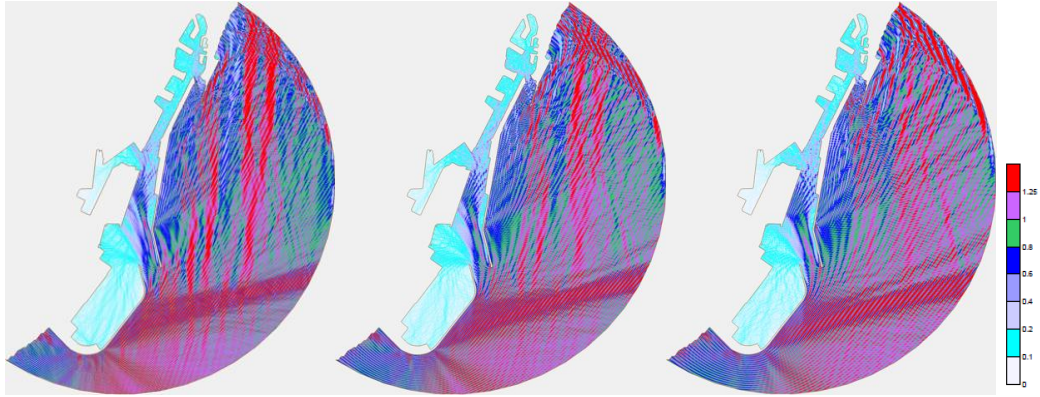


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 170^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 170^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 170^\circ$

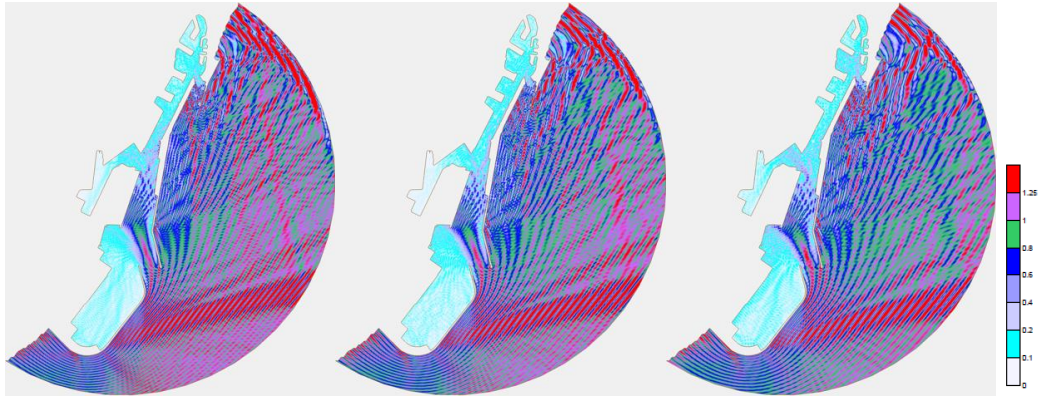




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 180^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 180^\circ$

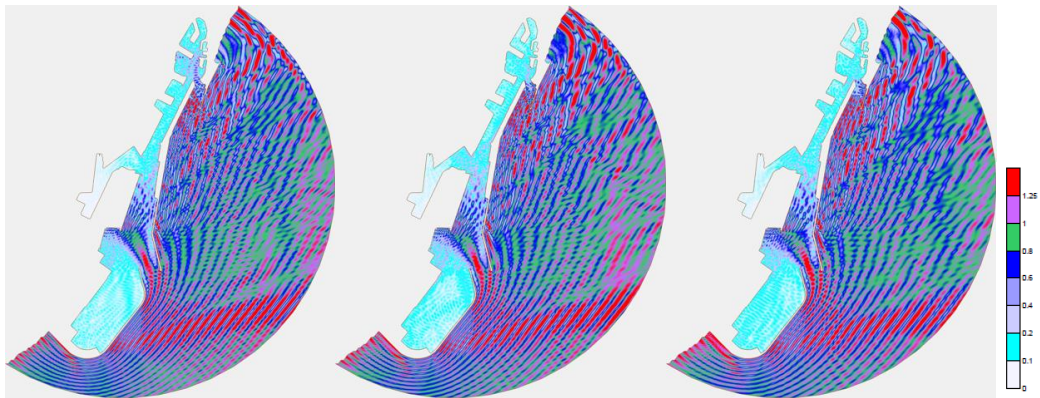
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 180^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 180^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 180^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 180^\circ$

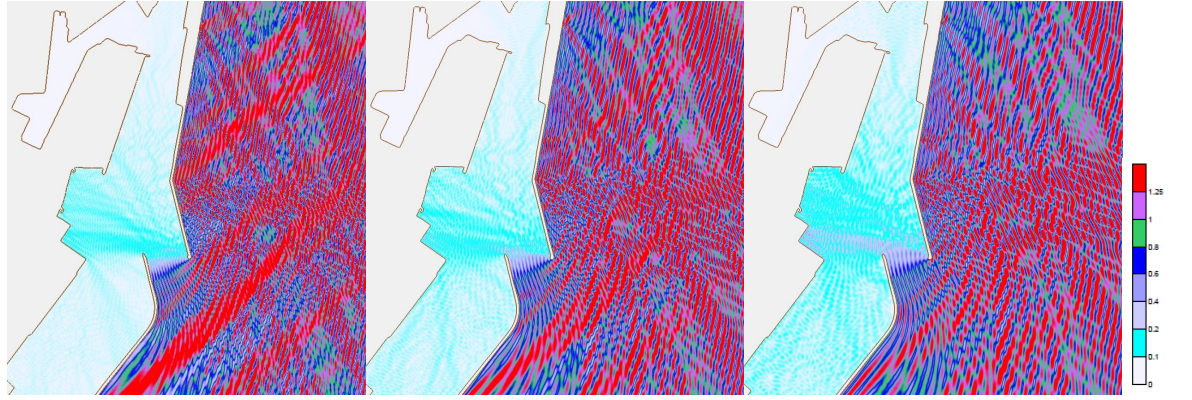


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 180^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 180^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 180^\circ$

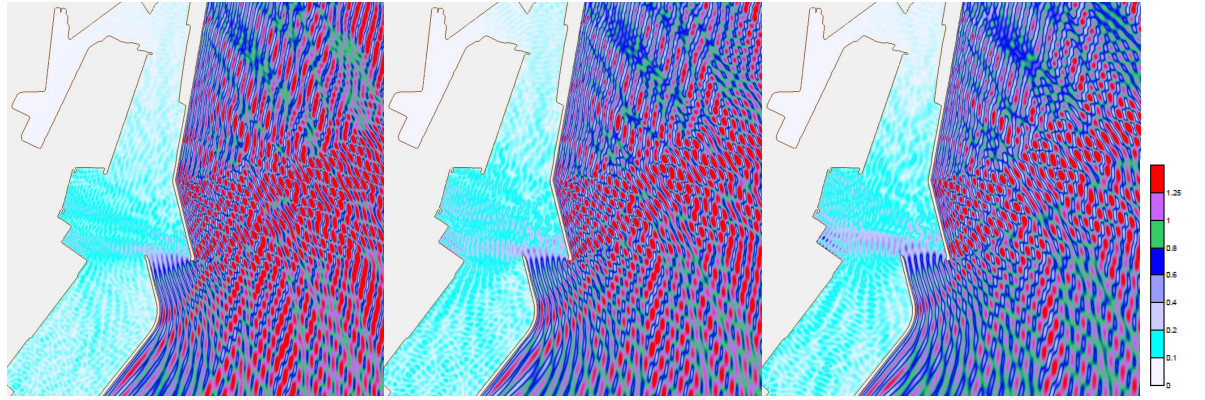




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 50^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 50^\circ$

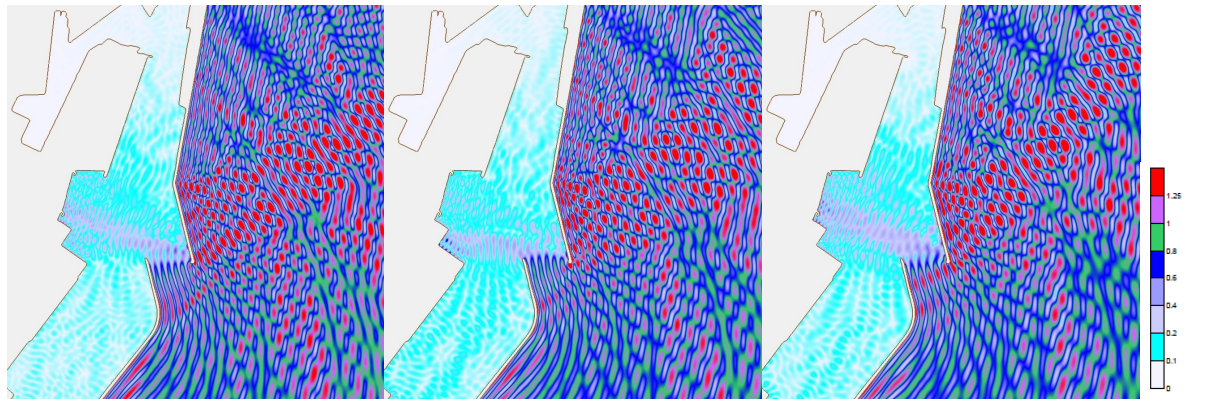
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 50^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 50^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 50^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 50^\circ$

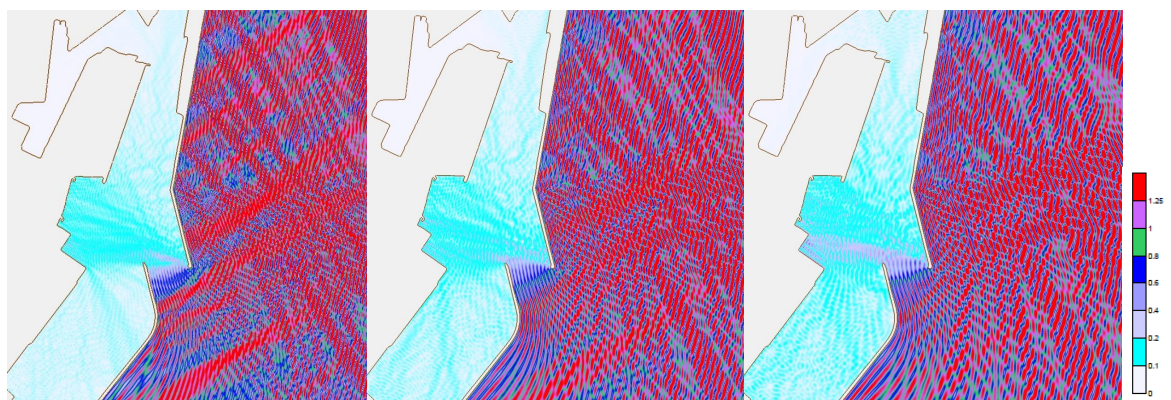


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 50^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 50^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 50^\circ$

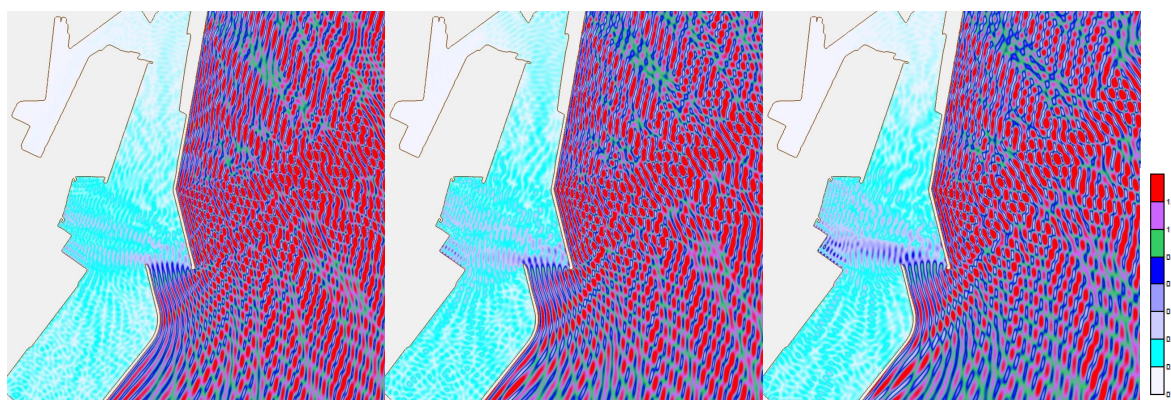




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 60^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 60^\circ$

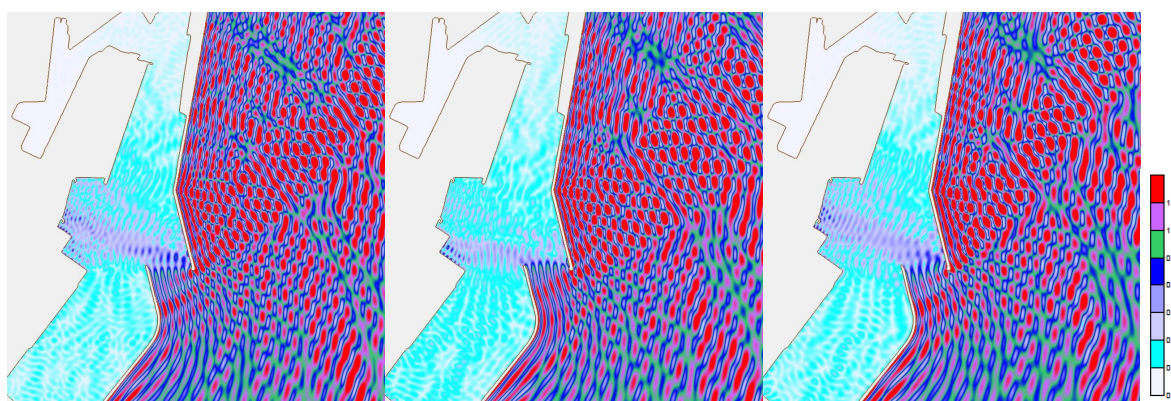
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 60^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 60^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 60^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 60^\circ$

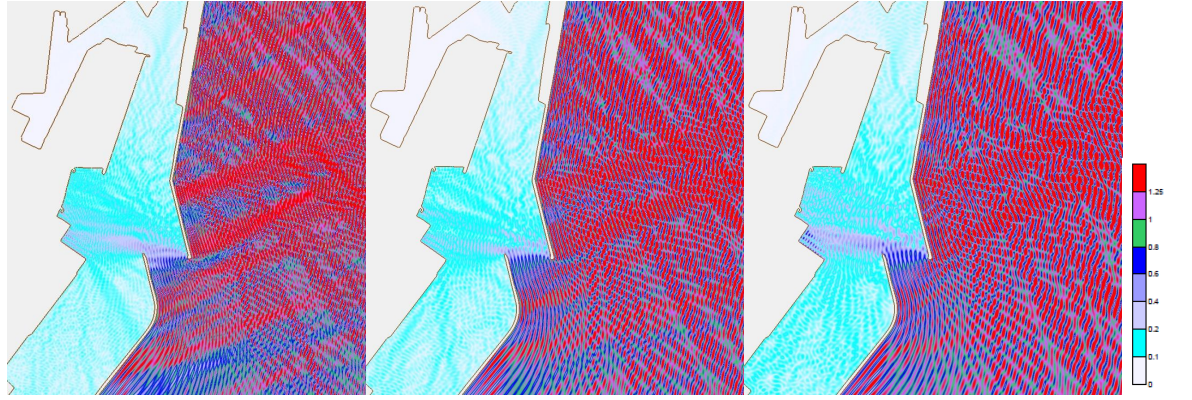


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 60^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 60^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 60^\circ$

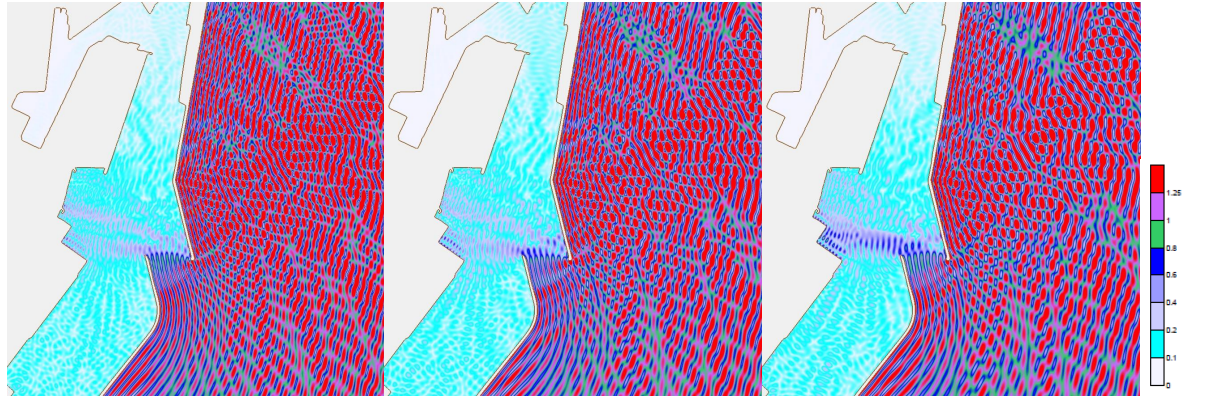




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 70^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 70^\circ$

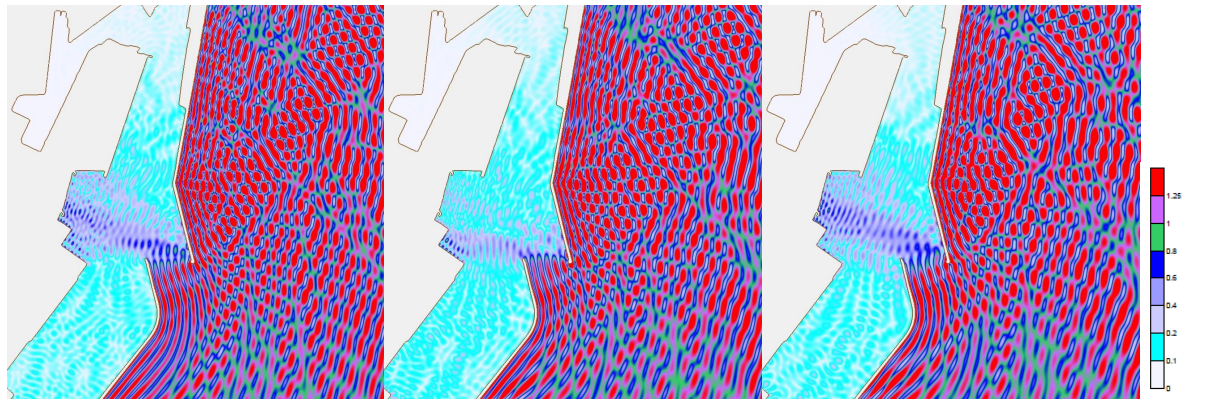
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 70^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 70^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 70^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 70^\circ$

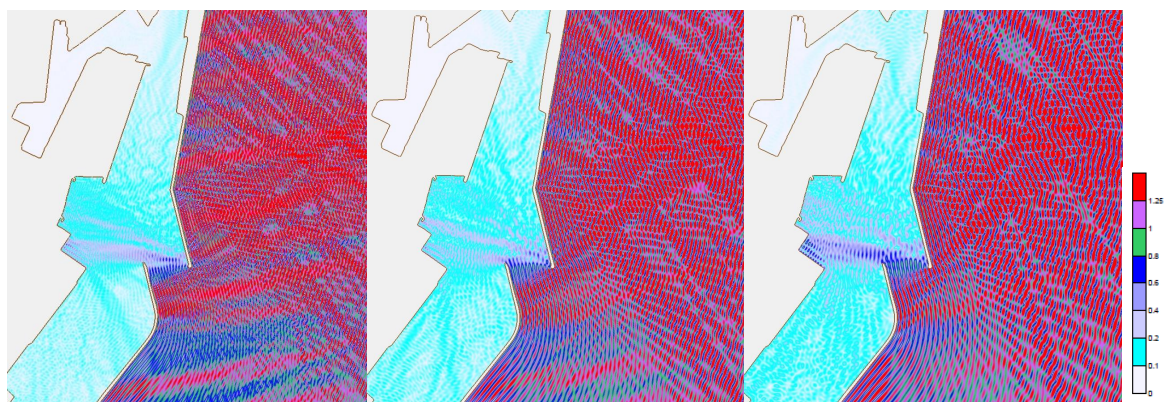


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 70^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 70^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 70^\circ$

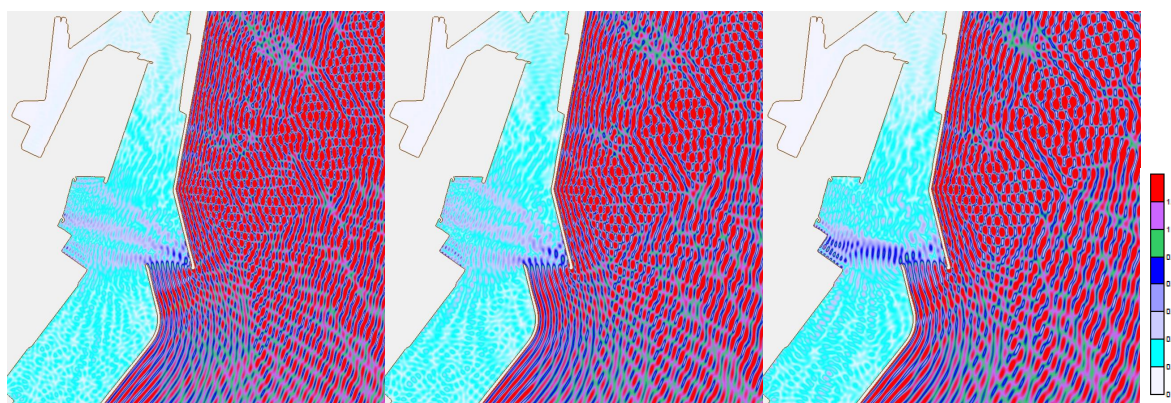




(a)  $T = 7 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

(b)  $T = 8 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

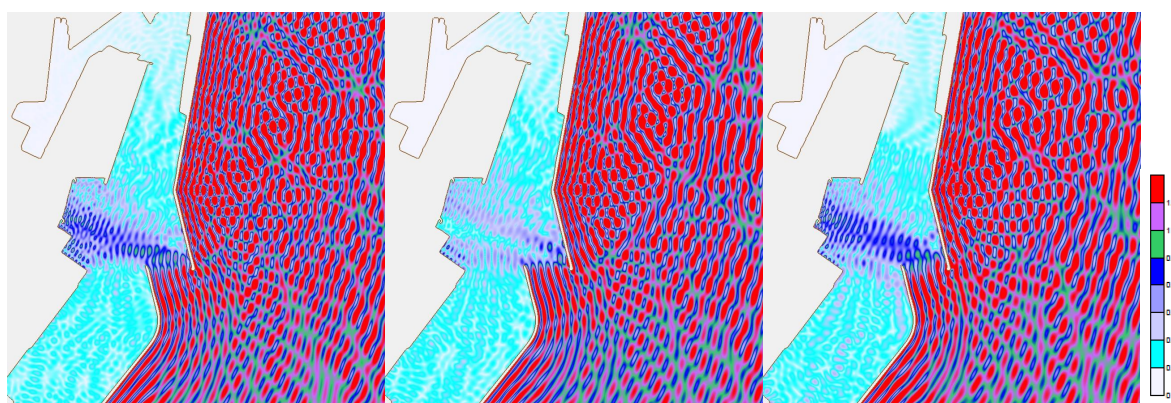
(c)  $T = 9 \text{ s}, \theta = 80^\circ$



(d)  $T = 10 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

(e)  $T = 11 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

(f)  $T = 12 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

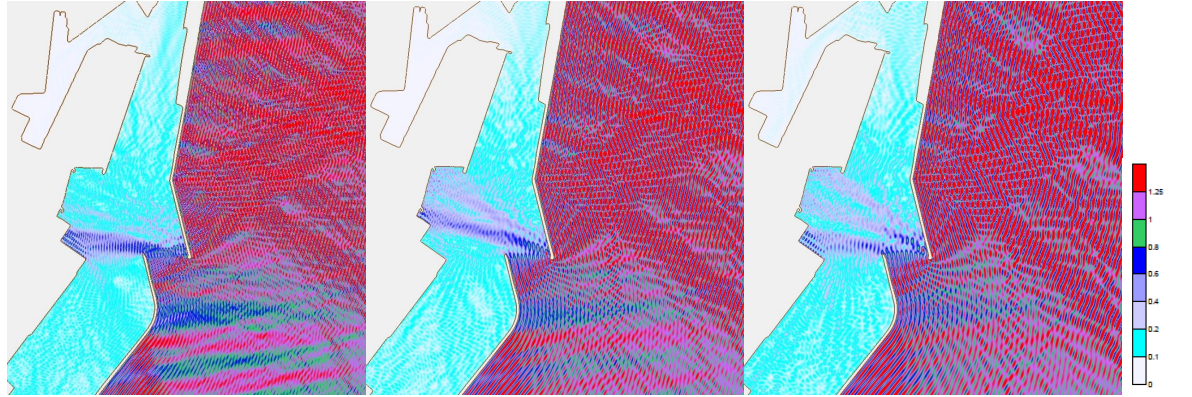


(g)  $T = 13 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

(h)  $T = 14 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

(i)  $T = 15 \text{ s}, \theta = 80^\circ$

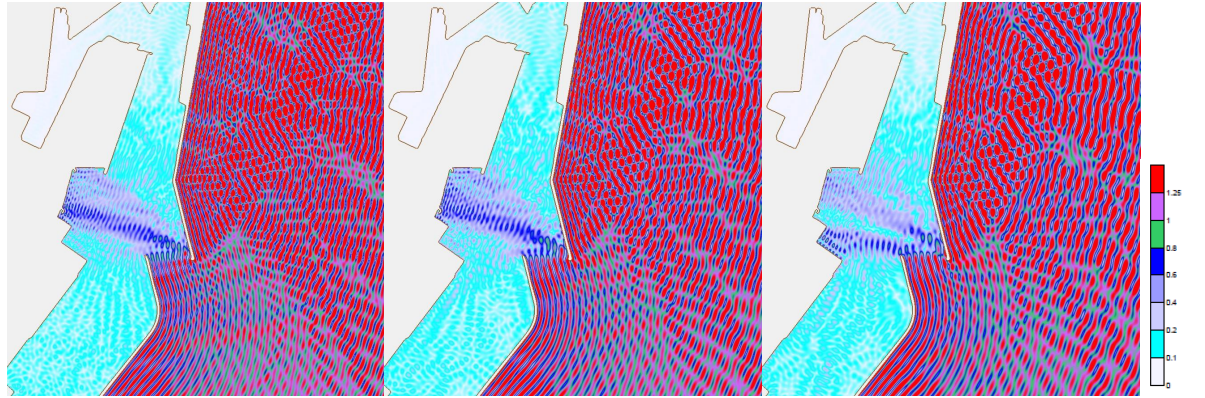




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 90^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 90^\circ$

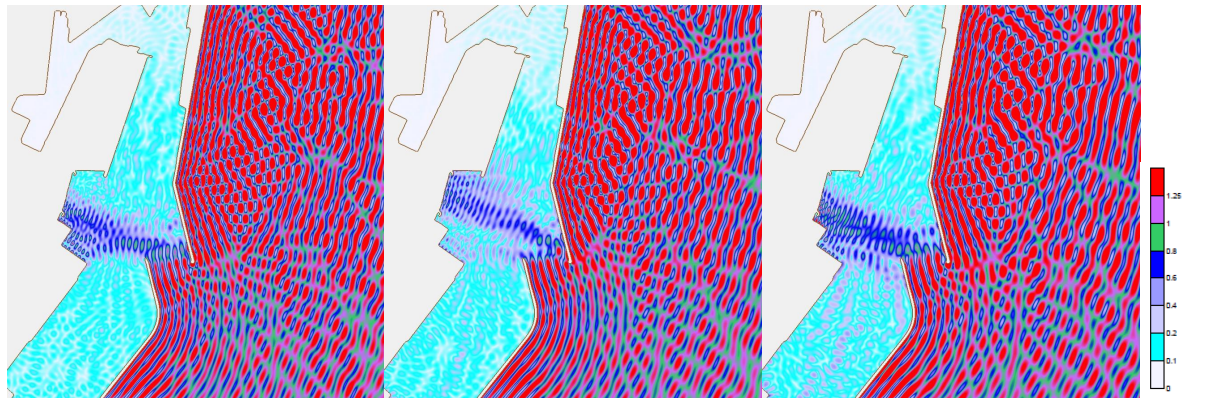
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 90^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 90^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 90^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 90^\circ$

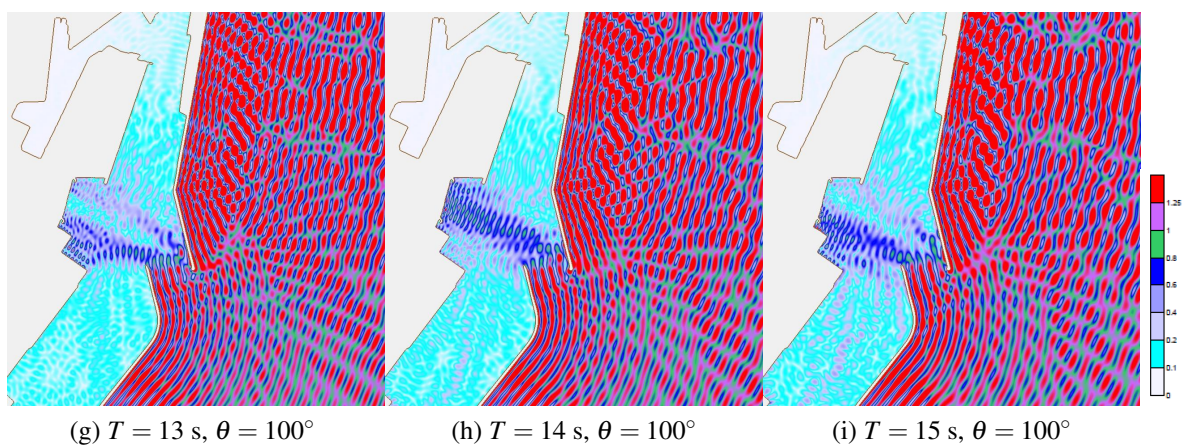
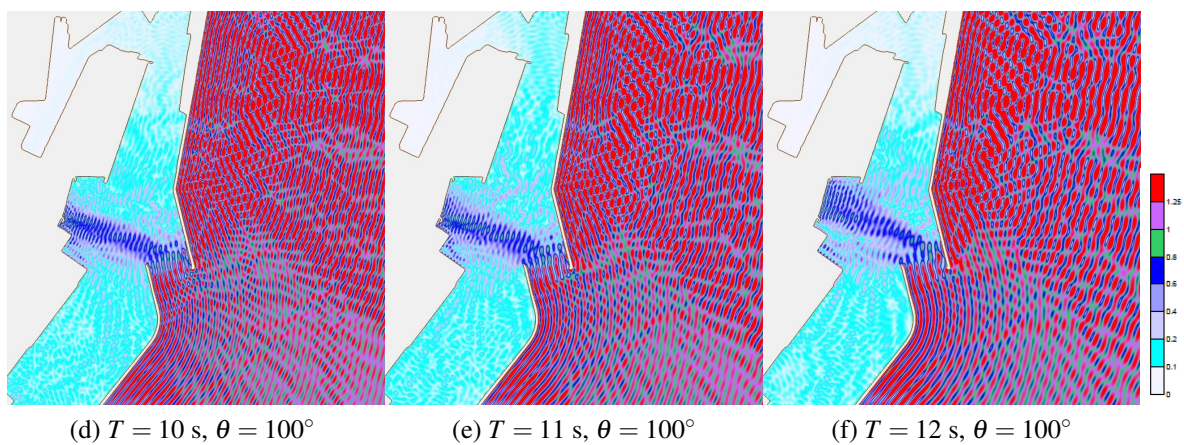
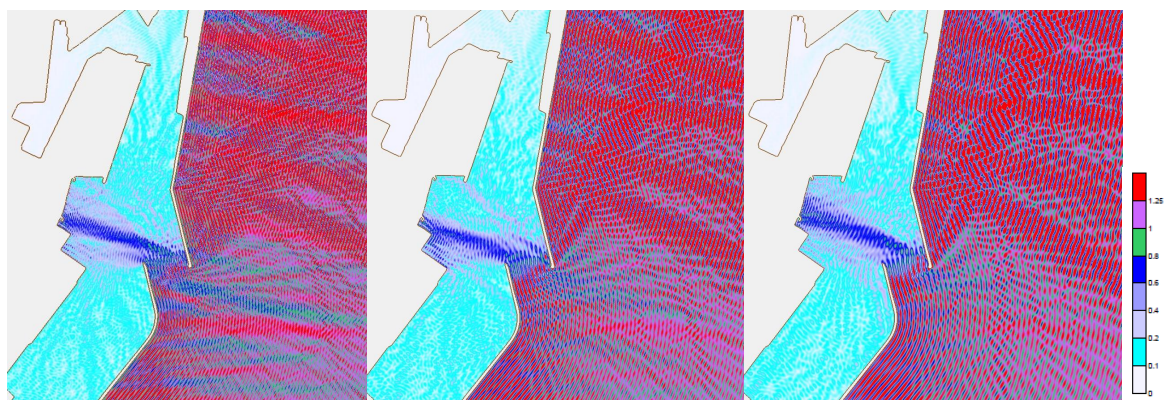


(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 90^\circ$

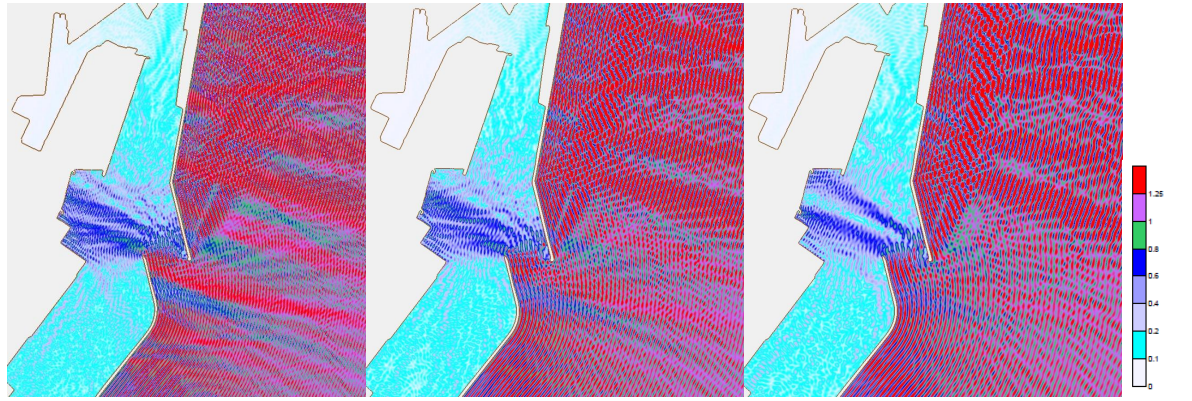
(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 90^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 90^\circ$





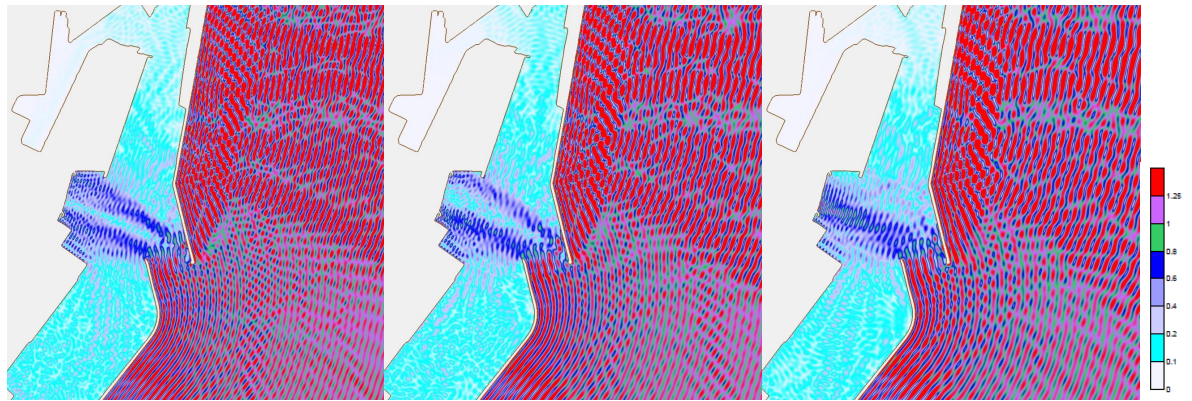




(a)  $T = 7 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

(b)  $T = 8 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

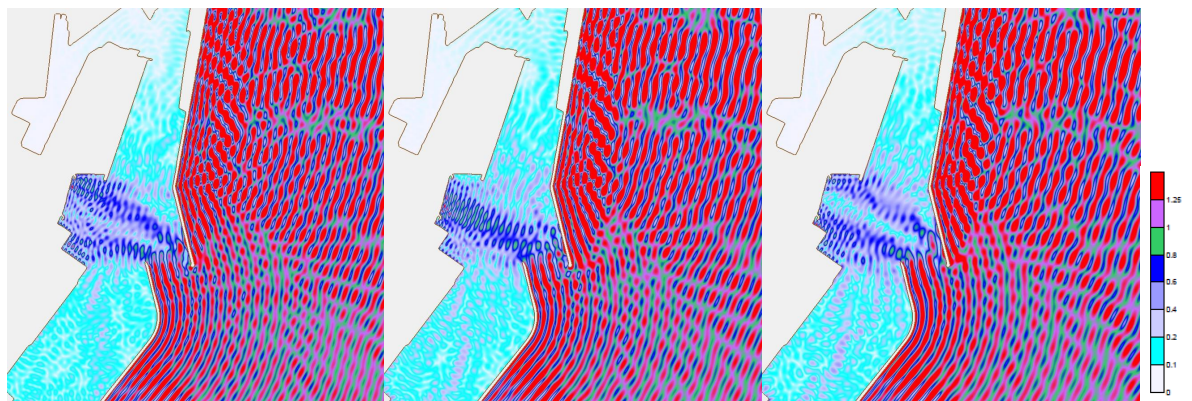
(c)  $T = 9 \text{ s}, \theta = 110^\circ$



(d)  $T = 10 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

(e)  $T = 11 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

(f)  $T = 12 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

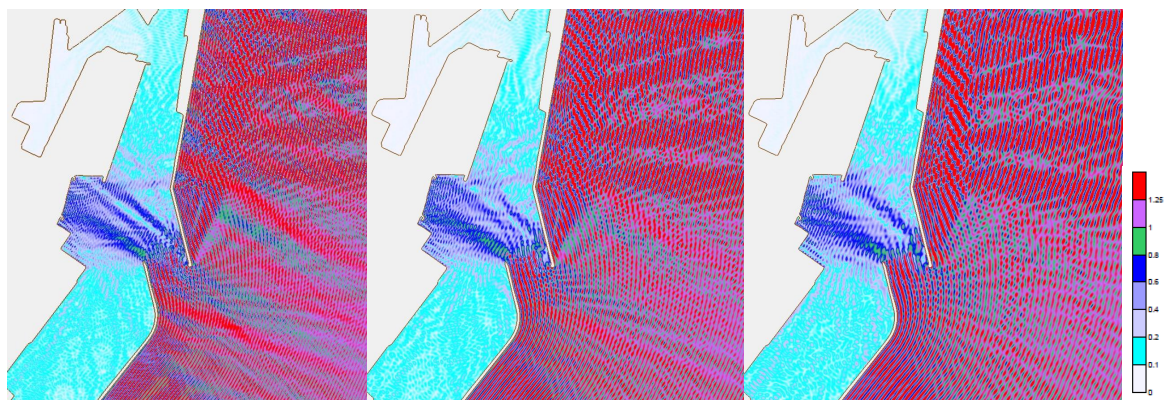


(g)  $T = 13 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

(h)  $T = 14 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

(i)  $T = 15 \text{ s}, \theta = 110^\circ$

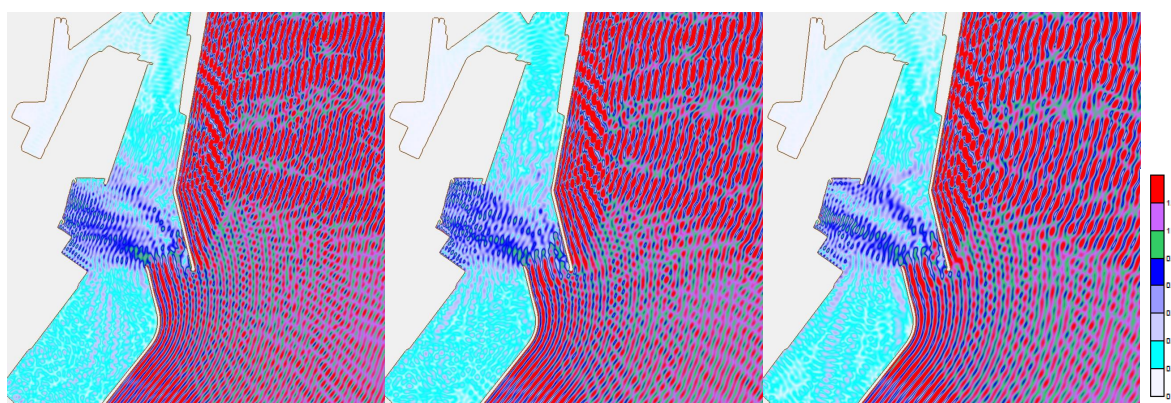




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

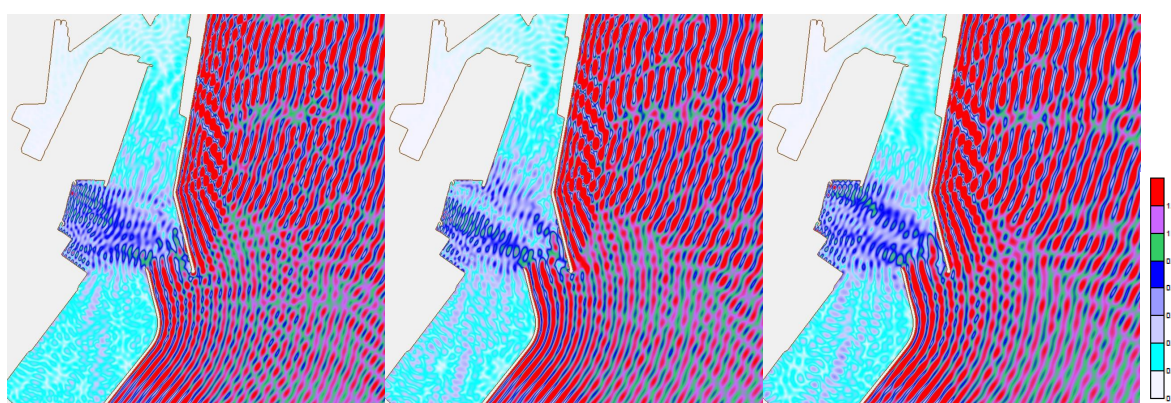
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

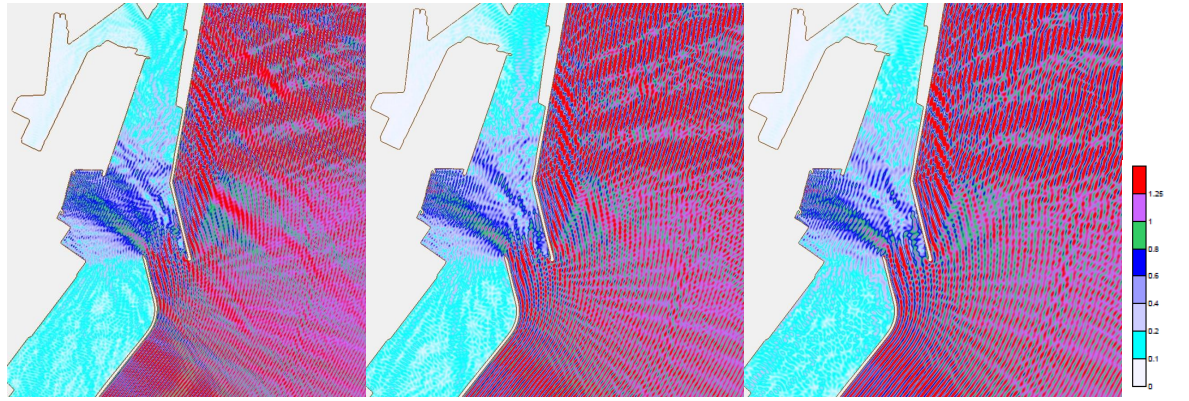


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 120^\circ$

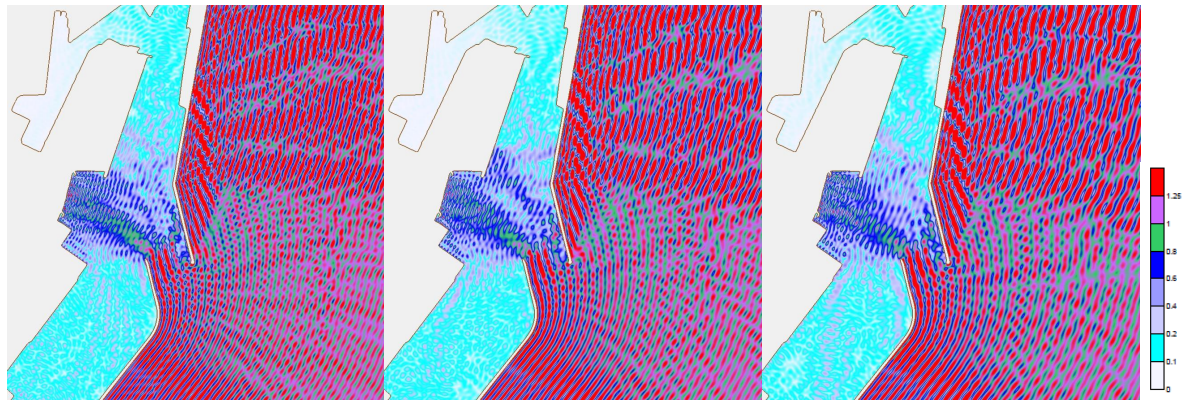




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

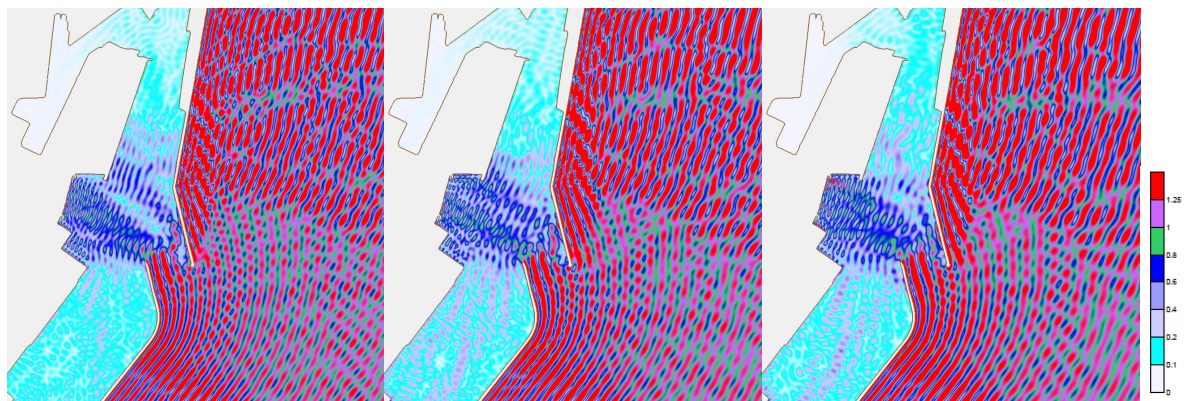
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

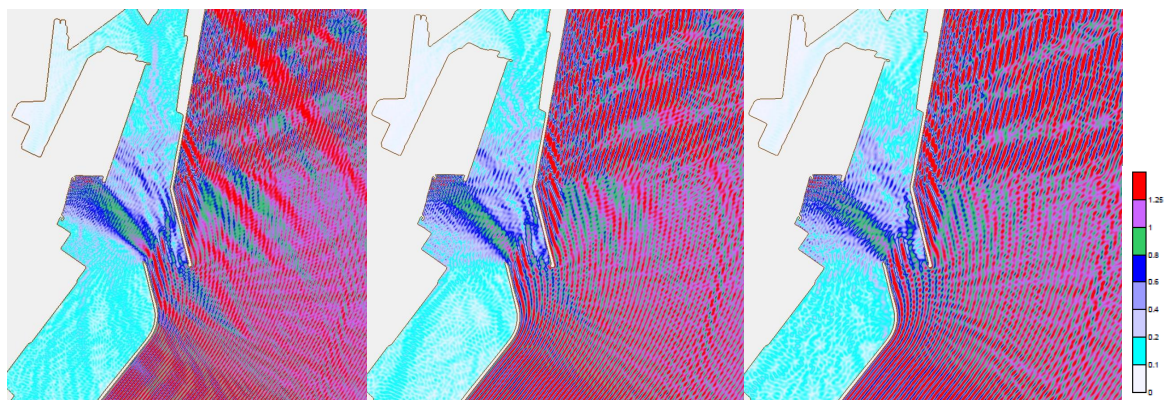


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 130^\circ$

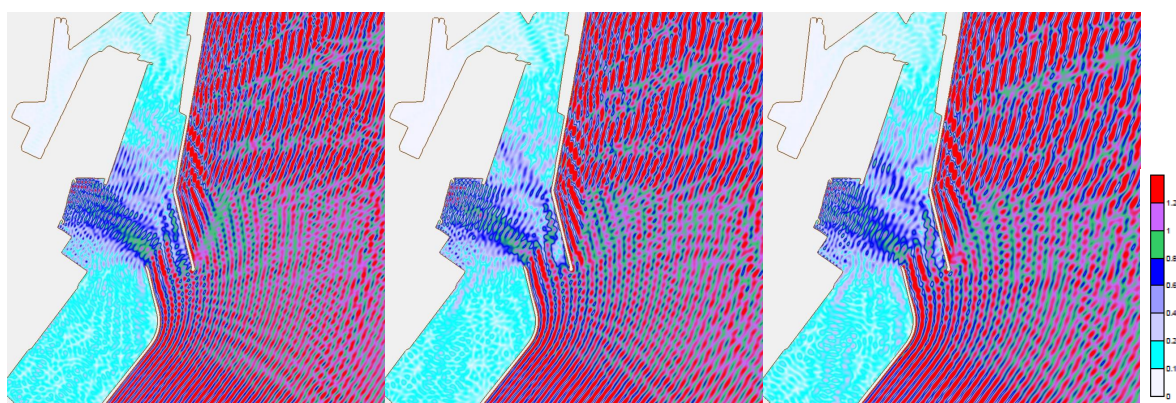




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

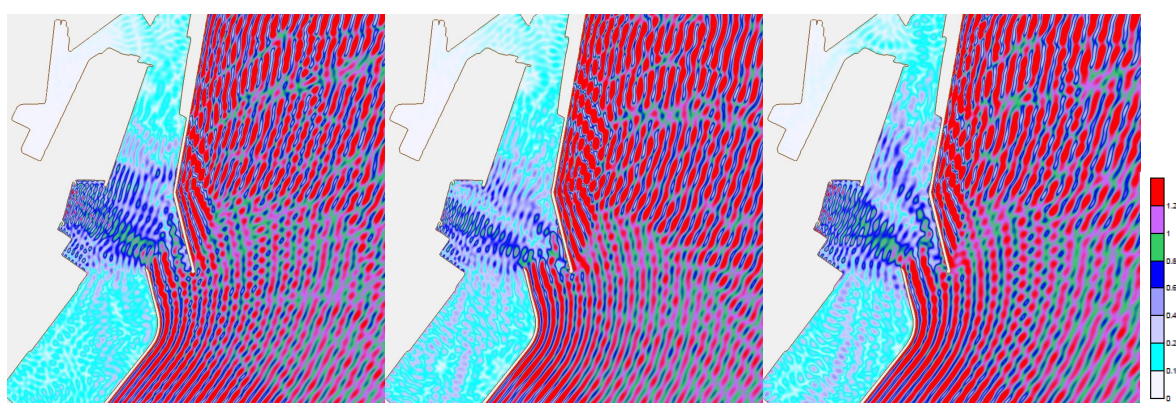
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

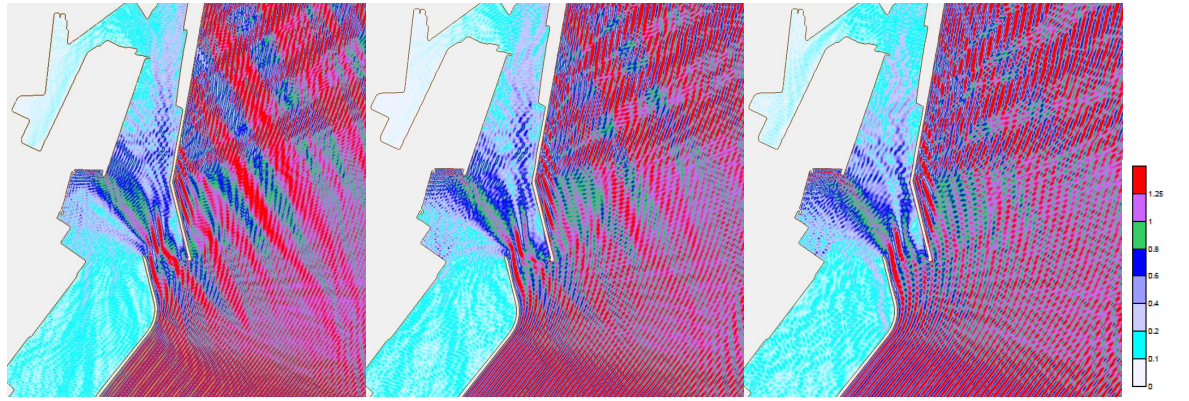


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 140^\circ$

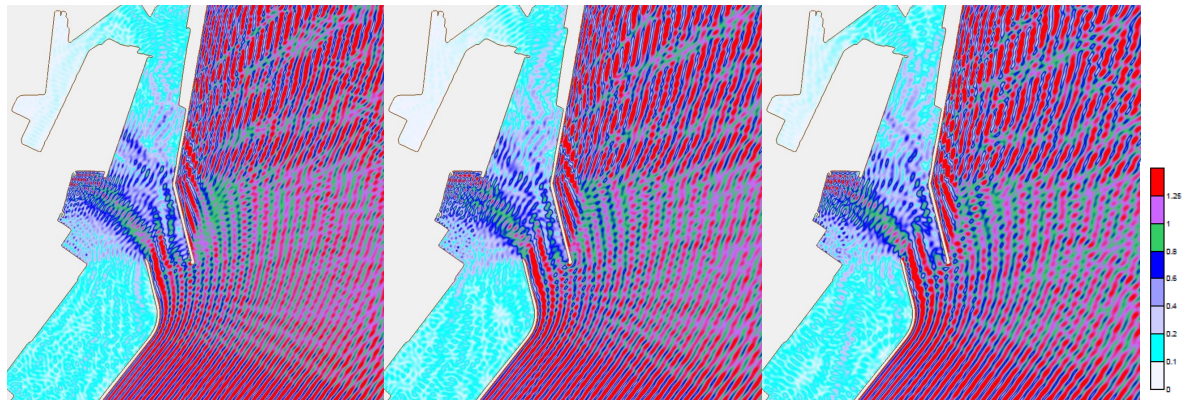




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

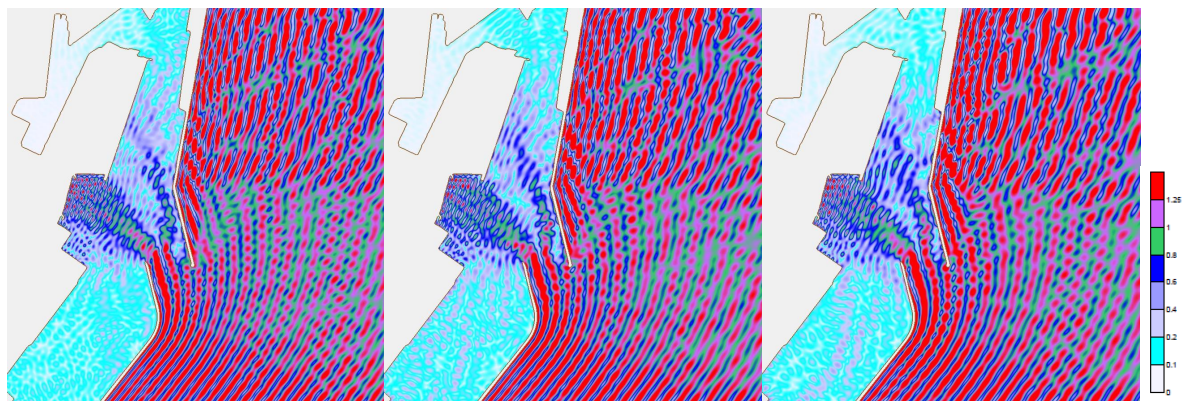
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

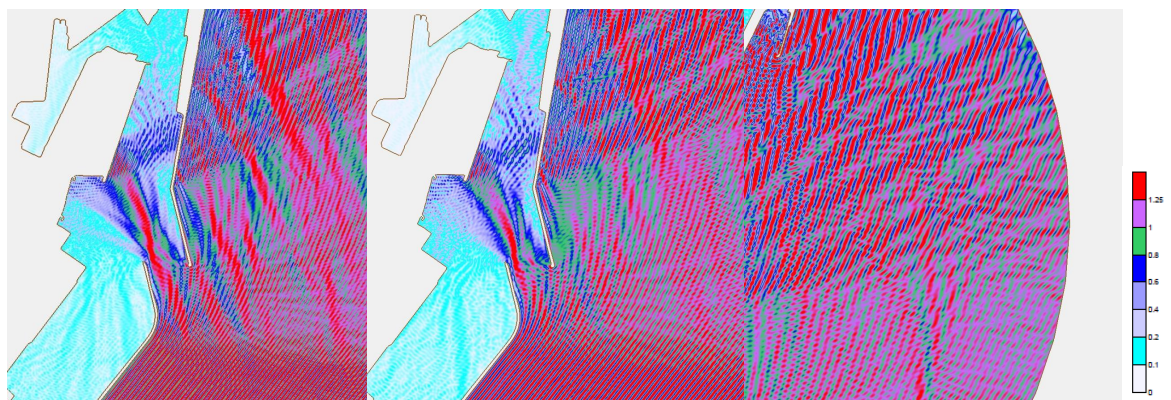


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 150^\circ$

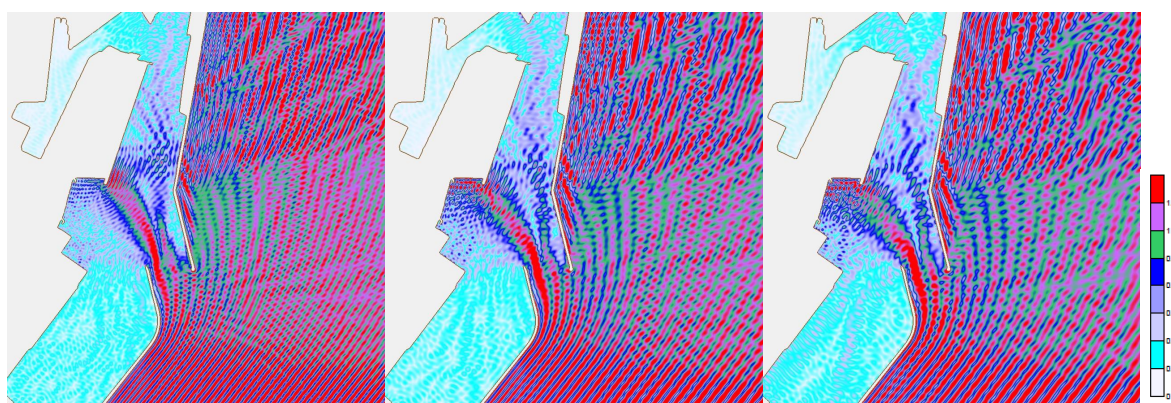




(a)  $T = 7 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

(b)  $T = 8 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

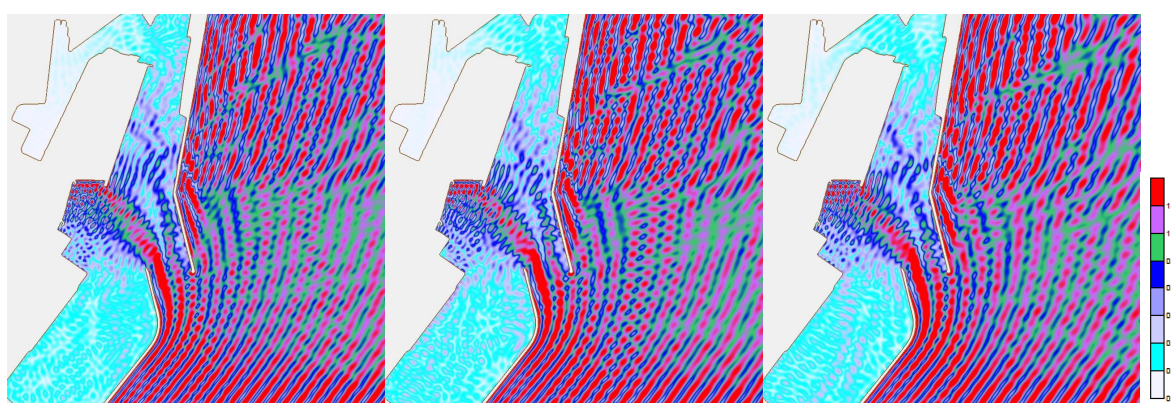
(c)  $T = 9 \text{ s}, \theta = 160^\circ$



(d)  $T = 10 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

(e)  $T = 11 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

(f)  $T = 12 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

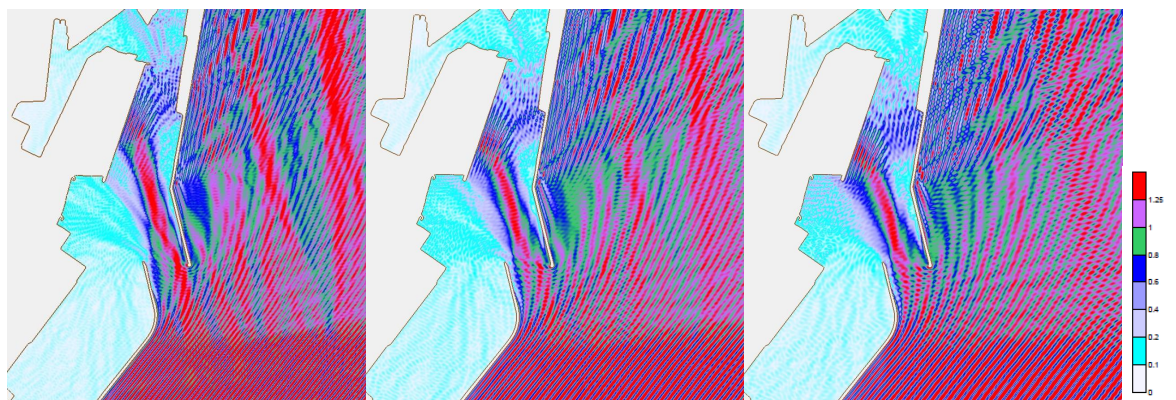


(g)  $T = 13 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

(h)  $T = 14 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

(i)  $T = 15 \text{ s}, \theta = 160^\circ$

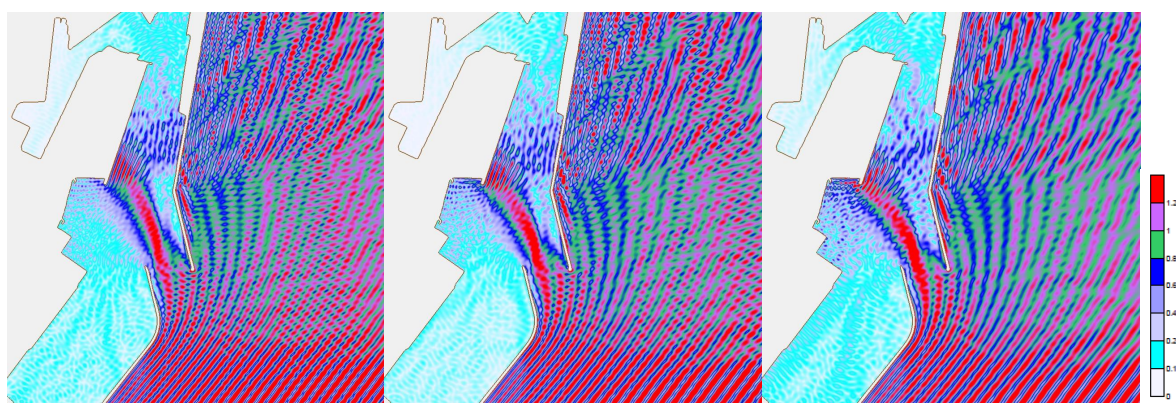




(a)  $T = 7\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

(b)  $T = 8\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

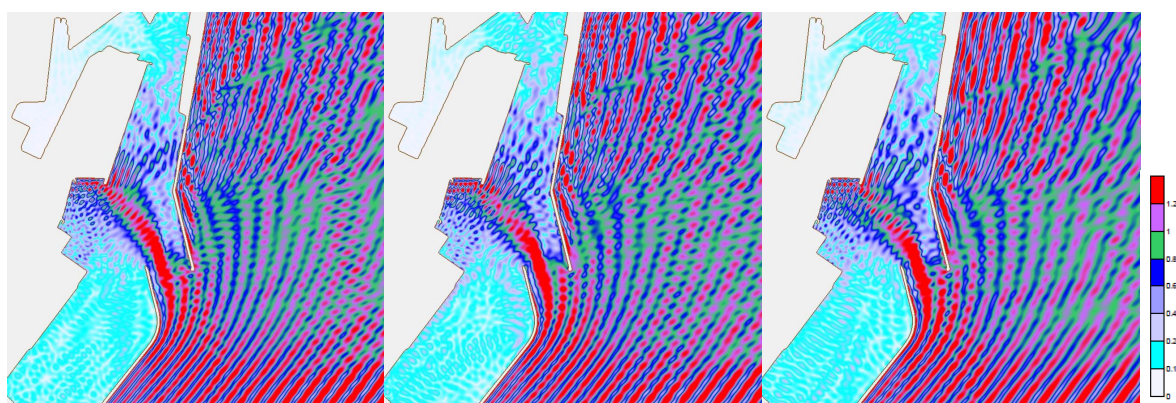
(c)  $T = 9\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$



(d)  $T = 10\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

(e)  $T = 11\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

(f)  $T = 12\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

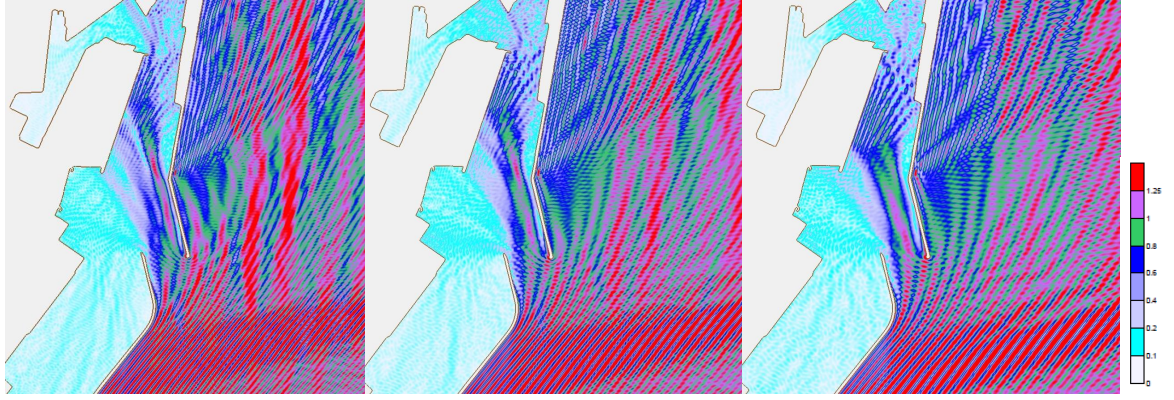


(g)  $T = 13\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

(h)  $T = 14\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

(i)  $T = 15\text{ s}$ ,  $\theta = 170^\circ$

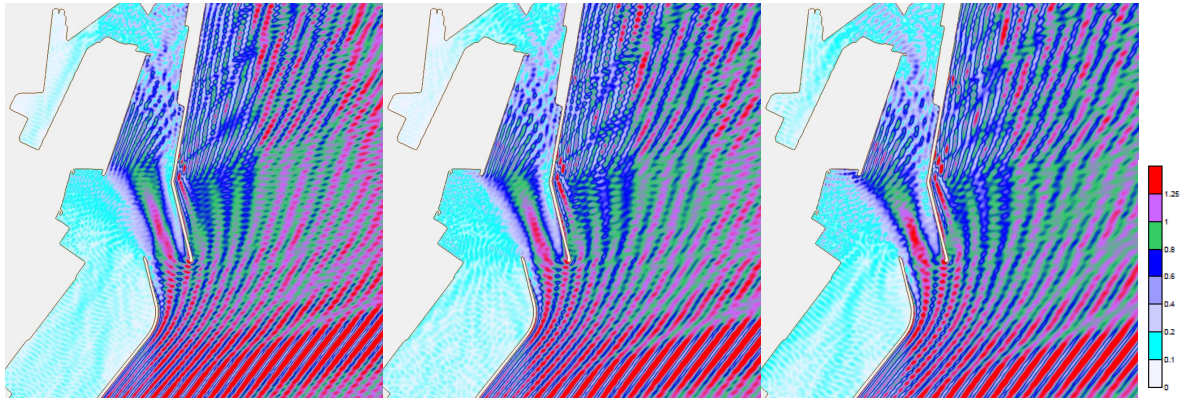




(a)  $T = 7$  s,  $\theta = 180^\circ$

(b)  $T = 8$  s,  $\theta = 180^\circ$

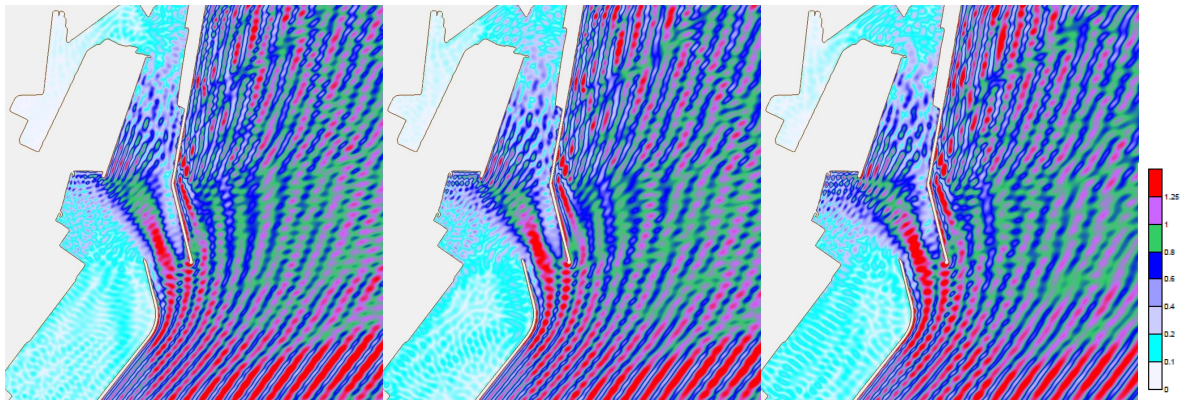
(c)  $T = 9$  s,  $\theta = 180^\circ$



(d)  $T = 10$  s,  $\theta = 180^\circ$

(e)  $T = 11$  s,  $\theta = 180^\circ$

(f)  $T = 12$  s,  $\theta = 180^\circ$



(g)  $T = 13$  s,  $\theta = 180^\circ$

(h)  $T = 14$  s,  $\theta = 180^\circ$

(i)  $T = 15$  s,  $\theta = 180^\circ$





# Apèndix B

## Codi PHP de la plataforma

```
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml" xml:lang="en">
<head>
<title>Tesina de la Laura Casas</title>
<meta http-equiv="Content-Type" content="application/xhtml+xml;
charset=iso-8859-1" />
<meta name="keywords" content="" />
<meta name="description" content="" />
<meta http-equiv="imagetoolbar" content="no" />
<link href="style/stylessheet.css" rel="stylesheet" type="text/css" />
</head>

<body>
<div id="container">
<div id="header">
<h1>&nbsp;</h1>
<h2>&nbsp;</h2>
</div>
<div id="long_content">

<?php
$password = "usuari2011";

if ( $_POST['txtPassword'] != $password )
{

?>
<div align="center">
```

<h3>Login</h3>

```
<form name="form" method="post"
action="<?php echo $_SERVER['PHP_SELF']; ?>">
<p><label for="txtpassword">Password:</label>
<br /><input type="password" title="Enter your password"
name="txtPassword" /></p>
```

```
<p><input type="submit" name="Submit" value="Login" /></p>
</form>
</div>
```

```
<?php
}
else
{
function ftp_get_contents ($conn_id, $filename)
{
$tempHandle = fopen('php://temp', 'r+');
if (@ftp_fget($conn_id, $tempHandle, $filename, FTP_ASCII, 0))
{
rewind($tempHandle);
return stream_get_contents($tempHandle);
}
else
{
return false;
}
}
}
```

```
date_default_timezone_set('Europe/Madrid');
```

```
$con = ftp_connect ( 'ftp.simo.cat' );
ftp_login($con, 'clientes@simo.cat', '398$SuVUn2');
$file = trim(ftp_get_contents($con,
sprintf('Agitacion/oleaje_%s.dat',date('dm20y'))));
```

```
$list = sscanf($file, str_repeat("%d %f %f %f ", 24));
```

```
if ( $_POST['txtHour'] )
{
```

```

$hora = $_POST['txtHour'];
}
else
{
$hora = date('H');
}

$periode = min(max(8,round($list[$hora*4+2])),14);
$angle    = min(max(50,round($list[$hora*4+3]/10)*10),180);
?>

<div id="left_sidebar">

</div>
<div id="right_sidebar">

</div>

<div>
<h3 id="intro" title="The Introduction"> <
big> <br> LA PREDICCI&Oacute; DE L'ESTAT D'AGITACI&Oacute; EN EL PORT DE
BARCELONA </big></h3>
<h4> Laura Casas, 2011. </h4>
<p> &nbsp; </p>
<p> <b> Introducci&Oacute;; </b> Aquesta p&agrave;gina web ha estat
dissenyada per presentar els resultats de la Tesina <b> Prediccions
d'agitaci&Oacute; portu&agrave;ria utilitzant un model Mild-Slope
en Elements Finitis. Aplicaci&Oacute; al Port de Barcelona</b> de
la titulaci&Oacute; d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports.
L'objectiu &eacute;s que l'usuari tingui acc&eacute;s de manera
r&agrave;pida i senzilla a una eina que li permeti visualitzar
les prediccions d'agitaci&Oacute; a l'interior del port de Barcelona.
Aquesta plataforma permet consultar l'estat de la mar amb antelaci&Oacute;
i d'aquesta manera millorar la operativitat i efici&egrave;ncia del port.
El resultats mostrats han estat obtinguts mitjan&ccedil;ant el
programari CGWAVE basant-se en les prediccions de propagaci&Oacute;
de Previmer. Per m&eacute;s informaci&Oacute;
consultar Tesina.</p>
</div>

```

```

<div align="center">
<p align="center">  <big><big><big><big>
<span style="font-weight: bold;"> Dia:
<?php date_default_timezone_set('Europe/Madrid');
print date('d/m/y');?> Hora:
<?php date_default_timezone_set('Europe/Madrid');
print date('H:i'); ?>
</span></big></big></big></big></p>
<table style="text-align: left; width: 100%;" border="0"
cellpadding="2" cellspacing="1">
<tbody>
<tr>
<td style="text-align: center; vertical-align: top;">
<a href="<?php echo sprintf('./simulacions/T%02d-%d-%d.jpg',
$periode,(270-$angle),$angle); ?>" target="_blank" >

</a>
</td>
<td style="text-align: center; vertical-align: middle;">

</td>
<td style="text-align: center; vertical-align: middle;">

<table border="1" align="center">
<tr>
<th> Període </th>
<th> Alçada de l'onatge </th>
<th> Angle incident </th>
</tr>
<tr>
<td> <?php echo $list[$hora*4+2]; ?> s </td>
<td>
<?php echo $list[$hora*4+1]; ?> m </td>
<td>

```





```

08:00</option>
<option value="9"
<?php if($hora == 9) echo ' selected="selected" '; ?> >
09:00</option>
<option value="10"
<?php if($hora == 10) echo ' selected="selected" '; ?> >
10:00</option>
<option value="11"
<?php if($hora == 11) echo ' selected="selected" '; ?> >
11:00</option>
<option value="12"
<?php if($hora == 12) echo ' selected="selected" '; ?> >
12:00</option>
<option value="13"
<?php if($hora == 13) echo ' selected="selected" '; ?> >
13:00</option>
<option value="14"
<?php if($hora == 14) echo ' selected="selected" '; ?> >
14:00</option>
<option value="15"
<?php if($hora == 15) echo ' selected="selected" '; ?> >
15:00</option>
<option value="16"
<?php if($hora == 16) echo ' selected="selected" '; ?> >
16:00</option>
<option value="17"
<?php if($hora == 17) echo ' selected="selected" '; ?> >
17:00</option>
<option value="18"
<?php if($hora == 18) echo ' selected="selected" '; ?> >
18:00</option>
<option value="19"
<?php if($hora == 19) echo ' selected="selected" '; ?> >
19:00</option>
<option value="20"
<?php if($hora == 20) echo ' selected="selected" '; ?> >
20:00</option>
<option value="21"
<?php if($hora == 21) echo ' selected="selected" '; ?> >
21:00</option>
<option value="22"

```

```

<?php if($hora == 22) echo ' selected="selected" '; ?> >
22:00</option>
<option value="23"
<?php if($hora == 23) echo ' selected="selected" '; ?> >
23:00</option>
</select>
<input type="hidden" name="txtPassword"
value="<?php echo $_POST['txtPassword']; ?>" />
<input type="submit" value="Mostra" />
</form>
</p>

</div>

<div>
<?php
}

?>
</div>
</div>

<div id="footer">
Copyright &copy; 2010 Laura Casas. All Rights Reserved.<br />
<!-- If you would like to use this template,
I ask that you keep the following line of code intact -->
Design by <a href="http://www.growldesign.co.uk"
target="_blank">growldesign</a>
</div>
</div>
</body>
</html>

```